MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

REBOBINADO • REPARACION DE AVERIAS MODIFICACIONES

JOSE MANUEL PUCHOL VIVAS

Dr. Ingeniero Industrial

Ex-Ingeniero de cálculo y proyecto de máquinas eléctricas de Johannes Hübner Fabrik elektrischer Maschinen, Berlin

EDITORIAL LIMUSA

MEXICO 1978

© José Manuel Puchol Vivas.

Todos los derechos reservados:
© 1978 EDITORIAL LIMUSA, S.A.
Arcos de Belén 75, México 1, D.F.
Miembro de la Cámara Nacional de la
Industria Editorial. Registro Núm. 121.

Segunda edición: 1978
Impreso en México
(2401)

ESTA OBRA SE TERMINO DE IMPRIMIR EL DIA 13 DE FEBRERO DE 1978, EN LOS TALLERES DE REPRODUCCIONES FOTOMECANICAS, S. A., 21 DE AGOSTO 16, COPILCO EL BAJO, MEXICO 20, D.F.

LA EDICION CONSTA DE 3,000 EJEMPLARES
Y SOBRANTES PARA REPOSICION

KE — 518 — 90

motores de corriente alterna

PROPOSITO DE LA OBRA

Para mí representa una gran satisfacción el enjuiciar y presentar esta obra al público de habla hispana, según invitación y deseo del propio autor.

La obra del ingeniero industrial J. M. Puchol, **Motores de corriente alterna**, es un libro eminentemente práctico, que será muy bien acogido por todos los interesados en máquinas eléctricas —escuelas de formación profesional y técnica, y muy especialmente fábricas y talleres de reparación, diseñadores y ejecutores de bobinados—, debido principalmente a la claridad y sencillez de su exposición (experimentada ya en otra obra del mismo autor, **Electrónica Razonada**, cuya aceptación ha sido extraordinaria), a la gran profusión de láminas y fotografías, y a estar la bibliografía de habla hispana verdaderamente escasa de obras teórico-prácticas como la presente.

Experiencia, labor de recopilación y sentido de abstracción han permitido al autor componer esta obra sin complicaciones matemáticas, pero exponiéndola de tal forma que puede ser leída con agrado o consultada tanto por un técnico, como por un maestro de taller o un operario dotado de mente clara, aunque sin una sólida preparación matemática.

Es por ello una obra verdaderamente pedagógica para un gran público, y una herramienta útil de trabajo para las oficinas técnicas de diseño, que siempre están escasas de tiempo, y pueden encontrar aquí muchos de sus esquemas, métodos, etc.

El volumen comprende tres partes: La primera, forma una exposición de conceptos teóricos, imprescindibles para el estudio de bobinados y para la comprensión de la esencia del motor trifásico.

El método de la estrella de ranuras (que permite obtener fácilmente el arrollamiento de cualquier máquina eléctrica rotativa) está clarísimamente explicado a través de numerosos ejemplos, y aunque este método ya había sido expuesto por otros autores, nunca como en el libro de Puchol se pusieron sus posibilidades prácticas al alcance del taller.

Cabe destacar también el sencillo sistema práctico que da el autor para determinar la posibilidad de efectuar conexiones en paralelo de bobinas, y asimismo el capítulo dedicado a los motores de dos velocidades.

La segunda parte del libro, la componen 120 láminas a tres colores, de los bobinados más utilizados, con la representación en cada caso de la estrella de ranuras correspondiente, y a continuación 110 esquemas de conexiones, conjunto que reúne todos los casos de conexión para arrollamientos trifásicos de hasta 12 polos.

Ambas colecciones, cuyo interés práctico es enorme, son seguramente únicas en la literatura técnica mundial, y representan una aportación excepcional al ahorro de tiempo.

La tercera parte de la obra, es la que tiene mayor recopilación de experiencias y datos prácticos. Comienza con un capítulo sobre aislamientos y materiales aislantes, tema al que en general se presta poca atención, y que aquí viene expuesto con minuciosidad y multitud de datos y orientaciones útiles.

Le sigue otro de organización interna de un taller de bobinado, que ha de ser de gran interés para pequeñas industrias, y el libro concluye con cuatro capítulos dedicados, respectivamente, a la realización práctica de los bobinados, a la localización sistemática y reparación de averías, al cálculo del factor de bobinado, y a las modificaciones de los motores trifásicos.

Esta tercera parte, especialmente, se acompaña con una gran profusión de fotografías de talleres y útiles de trabajo, muy bien seleccionadas, de actuales técnicas utilizadas en las grandes fabricaciones en serie y, también, en pequeños talleres de reparación.

LUIS HUMET CODERCH
Catedrático de Electrotecnia y Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Tarrasa

AGRADECIMIENTO

El autor agradece la cordial asistencia que para la obtención de fotografías e información técnica ha recibido de numerosas empresas nacionales y extranjeras, y muy particularmente la recibida de H. Schümann (Alemania), Siemens (Alemania), A. E. G. (Alemania), Asea (Suecia), Siemens (España), Asea/Ces (España) y Aismalibar (España).

Es grato para el autor destacar que la empresa Asea/Ces tuvo la atención de mostrarle su fábrica de motores trifásicos de San Quirico de Tarrasa, permitiéndole obtener allí cuantas fotos creyó convenientes.

El capítulo de aislamientos ha sido escrito bajo la atenta colaboración del ingeniero industrial señor Seró, subdirector comercial de Aismalibar, empresa que puso a disposición del autor fotos, tablas y demás interesante información técnica sobre el tema de aislamientos y materiales aislantes.

JOSE MANUEL PUCHOL VIVAS

INDICE

PRIMERA PARTE

I. ELECTROTECNIA APLICADA A LOS DEVANADOS

1. Introducción . . . 3
2. Intensidad de corriente eléctrica . . . 3
3. Conductores y aislantes . . . 3
4. Densidad de corriente eléctrica . . . 3
5. Máxima densidad de corriente admisible . . . 4
6. Relación entre diámetro y sección . . . 4
7. Resistencia óhmica; resistividad . . . 4
8. Tensión eléctrica . . . 5
9. Ley de Ohm . . . 5
10. Potencia perdida en un conductor atravesado por corriente . . . 5
11. Resistencias en serie . . . 6
12. Resistencias en paralelo . . . 6
13. Empleo práctico de las conexiones en paralelo . . . 7

II. MAQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS

1. Introducción . . . 9
2. Campo magnético. Imanes . . . 9
3. Campo magnético originado por una corriente que circula por un conductor rectilíneo . . . 9
4. Campo magnético originado por una corriente que pasa por un conductor circular . . . 10
5. Electroimanes . . . 10
6. Número de amperios-vuelta . . . 10
7. Flujo magnético . . . 10
8. Inducción magnética. . . . 10
9. Fenómenos electromagnéticos. Fuerza electromotriz inducida . . . 11
10. Generadores y motores eléctricos . . . 11
11. Constitución esencial de los motores y generadores eléctricos . . . 11

III. CORRIENTES ALTERNAS

1. Introducción . . . 12
2. Corriente continua . . . 12
3. Corriente alterna . . . 12
4. Frecuencia de la corriente alterna . . . 13
5. Generación de corrientes alternas . . . 13
6. Valores eficaces de la corriente y tensión alternas . . . 14
7. Desfase entre curvas sinusoidales . . . 14
8. Resistencia óhmica pura, reactancias inductiva y capacitiva . . . 15
9. Factor de potencia . . . 15
10. Potencia de una corriente alterna . . . 16

IV. CORRIENTES ALTERNAS POLIFASICAS

1. Introducción . . . 17
2. Grados geométricos y grados eléctricos . . . 17
3. Valor de la frecuencia de una corriente alterna . . . 18
4. Corriente alterna bifásica . . . 18
5. Corriente alterna trifásica . . . 19
6. Terminales, conexiones . . . 19
7. Conexión en triángulo . . . 20
8. Conexión en estrella . . . 20
9. Conexión en estrella, con hilo neutro . . . 21
10. Potencia activa (o real) de un sistema trifásico . . . 21
11. Potencias aparente y reactiva . . . 22

V. MAQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS PARA CORRIENTES TRIFASICAS

1. Introducción . . . 23
2. Alternadores. . . . 23
3. Alternadores trifásicos . . . 23
4. Motores asincrónicos . . . 24
5. Deslizamiento . . . 24
6. Motores asincrónicos trifásicos. . . . 24
7. Campo magnético giratorio . . . 25
8. Comparación de los arrollamientos trifásicos mencionados . . . 26

VI. COMPONENTES DE UN ARROLLAMIENTO. DATOS PARA SU EJECUCION

1. Introducción . . . 27
2. Bobina simple. lados de bobina, cabezas de bobina . . . 27
3. Representación de la bobina simple. Conexiones entre bobinas simples. 27
4. El grupo de bobinas como conjunto de bobinas simples . . . 28
5. Representación del grupo de bobinas. Conexiones entre grupos . . . 29
6. El devanado monofásico como conjunto de grupos de bobinas . . . 29
7. El arrollamiento trifásico como conjunto de devanados monofásicos . . . 30

8. Etapas del bobinado de una máquina eléctrica rotativa 30
9. Ejecución práctica del arrollamiento 30
10. Número de polos 30
11. Número de fases 31
12. Número de ranuras 31
13. Otros factores a tener en cuenta 31
14. Paso del devanado 31
15. Paso diametral 32
16. Paso acortado 32
17. Paso alargado 32
18. Número de ranuras por polo y fase 32

VII. PLAN DEL ARROLLAMIENTO Y CLASIFICACION DE LOS ARROLLAMIENTOS DE CORRIENTE ALTERNA

1. Introducción 33
2. Plan del arrollamiento 33
3. Clasificación de los arrollamientos de corriente alterna 34
4. Arrollamientos a una capa 34
5. Arrollamientos a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos . . 36
6. Arrollamientos a dos capas. 37
7. Arrollamientos enteros y fraccionarios 38
8. Arrollamientos mixtos 39
9. Resumen conjunto de los tipos de arrollamientos 40

VIII. METODO DE LA ESTRELLA DE RANURAS PARA DETERMINAR EL PLAN DEL ARROLLAMIENTO

1. Introducción 41
2. Fundamentos teóricos del método de la estrella de ranuras 41
3. Método práctico para dibujar la estrella de ranuras 42
4. Ejemplo 1.° Caso de una máquina con $N = 12$ ranuras y $p = 1$ par de polos 42
5. Ejemplo 2.° Caso de una máquina con $N = 12$ ranuras y $p = 2$ pares de polos 43
6. Ejemplo 3.° Caso de una máquina con $N = 30$ ranuras y $p = 4$ pares de polos 43
7. Regla para repartir los rayos de la estrella de ranuras entre los tres devanados parciales del arrollamiento trifásico 44
8. Aplicación al ejemplo 1.° : $N = 12$, $p = 1$. 44
9. Aplicación al ejemplo 2.° : $N = 12$, $p = 2$. 45
10. Aplicación al ejemplo 3.° : $N = 30$, $p = 4$. 46

IX. PASO DE LA ESTRELLA DE RANURAS AL PLAN DEL ARROLLAMIENTO

1. Introducción 47
2. Ejemplo 1.° : $N = 12$, $p = 1$ 47
3. Caso 1a: Arrollamiento a una capa, con bobinas de paso constante . 48
4. Caso 1b: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos 49
5. Caso 1c: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos 50
6. Caso 1d: Arrollamiento a dos capas 50
6a. Arrollamiento a dos capas, con paso diametral $y = 1 : 7$ 51
6b. Arrollamiento a dos capas, con paso acortado en dos ranuras 52
7. Ejemplo 2.° : $N = 12$, $p = 2$. 52
8. Caso 2a: Arrollamiento a una capa, con bobinas de paso constante . 53
9. Caso 2b: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos 53
10. Caso 2c: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos 53
11. Caso 2d: Arrollamiento a dos capas 54
12. Ejemplo 3.° : $N = 30$, $p = 4$. 54
13. Caso 3a: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos 54
14. Caso 3b: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos 54
15. Caso 3c: Arrollamiento a dos capas, con paso acortado $y = 1 : 4$. . 54

X. Parte I: CONDICIONES DE EJECUCION DE LOS ARROLLAMIENTOS

1. Introducción 56
2. Condiciones de ejecución de los arrollamientos trifásicos a una capa . 56
3. Condiciones de ejecución de los arrollamientos trifásicos a dos capas. 56

Parte II: ARROLLAMIENTOS A DOS CAPAS, CON N/6 NO ENTERO

1. Introducción 57
2. Ejemplo 1.° : $N = 15$ ranuras, $2p = 4$ polos 57
3. Ejemplo 2.° : $N = 21$ ranuras, $2p = 2$ polos 58
4. Conclusión 59

Parte III: ARROLLAMIENTOS MIXTOS

1. Introducción 59
2. Número de bobinas por grupo, en los arrollamientos mixtos 59
3. Método general para determinar el plan de arrollamientos mixtos . . 60
4. Arrollamientos mixtos cuando q es un número entero 61

XI. CONEXIONES DE LOS ARROLLAMIENTOS TRIFASICOS

1. Introducción 63
2. El grupo de bobinas como unidad fundamental de conexión 63
3. Arrollamientos con polos consecuentes 63
4. Arrollamientos con polos alternados 64

5. Conexión en serie de grupos de bobinas 66
6. Conexión larga en arrollamientos de polos alternados 66
7. Conexión en paralelo de grupos de bobinas 67
8. Conexión en serie-paralelo de grupos de bobinas 68
9. Posibilidad de conexión en paralelo de grupos de bobinas 68
10. Método práctico para determinar las posibles conexiones en paralelo. 69
11. Ventajas de los arrollamientos con posibilidades de conexiones en paralelo 74
12. Tablas de conexiones 75
13. Esquemas de conexión 76

XII. MOTORES ASINCRONICOS DE DOS VELOCIDADES

1. Introducción 77
2. Arrollamientos de polos conmutables 77
3. Fundamento de la conexión Dahlander 77
4. Método práctico para realizar arrollamientos de polos conmutables . . 78
5. Ejemplo: Motor trifásico de dos velocidades (8 y 4 polos), con $N = 24$. 79
6. Ejemplo: Motor trifásico de dos velocidades (4 y 2 polos), con $N = 24$. 80
7. Diversas conexiones Dahlander. 80
8. Conexión Dahlander: triángulo-estrella doble paralelo 81
9. Conexión Dahlander: estrella-estrella doble paralelo 81
10. Normas alemanas para la designación de los terminales 82
11. Números de ranuras del estator y del rotor 83
12. Potencia y momento de giro, en motores de dos velocidades 84

SEGUNDA PARTE

I. ARROLLAMIENTOS ENTEROS

— Estrella de ranuras para $N = 12$ y $2p = 2$ 88
— Seis arrollamientos diferentes para $N = 12$ y $2p = 2$ 89
— Estrella de ranuras para $N = 18$ y $2p = 2$ 92
— Cinco arrollamientos diferentes para $N = 18$ y $2p = 2$. 93
— Estrella de ranuras para $N = 24$ y $2p = 2$ 98
— Cinco arrollamientos diferentes para $N = 24$ y $2p = 2$. 99
— Estrella de ranuras para $N = 30$ y $2p = 2$ 104
— Tres arrollamientos diferentes para $N = 30$ y $2p = 2$ 105
— Estrella de ranuras para $N = 36$ y $2p = 2$ 108
— Tres arrollamientos diferentes para $N = 36$ y $2p = 2$ 109
— Estrella de ranuras para $N = 12$ y $2p = 4$ 112
— Arrollamiento a una capa para $N = 12$ y $2p = 4$ 113
— Estrella de ranuras para $N = 24$ y $2p = 4$ 114
— Cinco arrollamientos diferentes para $N = 24$ y $2p = 4$ 115
— Estrella de ranuras para $N = 36$ y $2p = 4$ 120
— Tres arrollamientos diferentes para $N = 36$ y $2p = 4$ 121
— Estrella de ranuras para $N = 18$ y $2p = 6$ 124
— Tres arrollamientos diferentes para $N = 18$ y $2p = 6$ 125
— Estrella de ranuras para $N = 36$ y $2p = 6$ 128
— Cinco arrollamientos diferentes para $N = 36$ y $2p = 6$ 129
— Estrella de ranuras para $N = 24$ y $2p = 8$ 134
— Cuatro arrollamientos diferentes para $N = 24$ y $2p = 8$. 135

II. ARROLLAMIENTOS FRACCIONARIOS

— Estrella de ranuras para $N = 15$ y $2p = 2$ 140
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 15$ y $2p = 2$ 141
— Estrella de ranuras para $N = 21$ y $2p = 2$ 142
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 21$ y $2p = 2$ 143
— Estrella de ranuras para $N = 27$ y $2p = 2$ 144
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 27$ y $2p = 2$ 145
— Estrella de ranuras para $N = 33$ y $2p = 2$ 146
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 33$ y $2p = 2$ 147
— Estrella de ranuras para $N = 15$ y $2p = 4$ 148
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 15$ y $2p = 4$ 149
— Estrella de ranuras para $N = 18$ y $2p = 4$ 150
— Tres arrollamientos diferentes para $N = 18$ y $2p = 4$ 151
— Estrella de ranuras para $N = 18$ y $2p = 4$ (modificada) 154
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 18$ y $2p = 4$ (conexiones en paralelo). 155
— Estrella de ranuras para $N = 21$ y $2p = 4$ 156
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 21$ y $2p = 4$ 157
— Estrella de ranuras para $N = 27$ y $2p = 4$ 158
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 27$ y $2p = 4$ 159
— Estrella de ranuras para $N = 30$ y $2p = 4$ 160
— Tres arrollamientos diferentes para $N = 30$ y $2p = 4$ 161
— Estrella de ranuras para $N = 30$ y $2p = 4$ (modificada) 164
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 30$ y $2p = 4$ (conexiones en paralelo). 165
— Estrella de ranuras para $N = 33$ y $2p = 4$ 166
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 33$ y $2p = 4$ 167
— Estrella de ranuras para $N = 27$ y $2p = 6$ 168
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 27$ y $2p = 6$ 169
— Estrella de ranuras para $N = 27$ y $2p = 6$ (modificada) 170
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 27$ y $2p = 6$ (conexiones en paralelo) 171
— Estrella de ranuras para $N = 27$ y $2p = 8$ 172
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 27$ y $2p = 8$ 173
— Estrella de ranuras para $N = 30$ y $2p = 8$ 174
— Tres arrollamientos diferentes para $N = 30$ y $2p = 8$ 175

— Estrella de ranuras para $N = 30$ y $2p = 8$ (modificada) 178
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 30$ y $2p = 8$ (conexiones en paralelo) 179
— Estrella de ranuras para $N = 33$ y $2p = 8$ 180
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 33$ y $2p = 8$ 181
— Estrella de ranuras para $N = 36$ y $2p = 8$ 182
— Cinco arrollamientos diferentes para $N = 36$ y $2p = 8$ 183
— Estrella de ranuras para $N = 36$ y $2p = 8$ (modificada) 188
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 36$ y $2p = 8$ (con 4 ramas en paralelo) 189
— Arrollamiento a dos capas, para $N = 36$ y $2p = 8$ (conexión en serie). 190

III. ARROLLAMIENTOS MIXTOS TRIFASICOS

— Arrollamiento mixto, para $N = 15$ y $2p = 2$, con bobinas trapeciales . . 192
— Arrollamiento mixto, para $N = 18$ y $2p = 2$, con cabezas en tres planos . 193
— Arrollamiento mixto, para $N = 21$ y $2p = 2$, con cabezas en tres planos . 194
— Arrollamiento mixto, para $N = 30$ y $2p = 2$, con cabezas en tres planos . 195
— Arrollamiento mixto, para $N = 18$ y $2p = 4$, con bobinas trapeciales . . 196
— Arrollamiento mixto, para $N = 30$ y $2p = 4$, con bobinas trapeciales . . 197
— Arrollamiento mixto, para $N = 36$ y $2p = 4$, con cabezas en tres planos . 198
— Arrollamiento mixto, para $N = 27$ y $2p = 6$, con cabezas en dos planos . 199
— Arrollamiento mixto, para $N = 36$ y $2p = 8$, con cabezas en dos planos . 200

IV. ARROLLAMIENTOS TRIFASICOS PARA DOS VELOCIDADES

— Arrollamiento para $N = 24$ y $2p = 4/2$ polos 202
— Arrollamiento para $N = 36$ y $2p = 4/2$ polos 203
— Arrollamiento para $N = 24$ y $2p = 8/4$ polos 204
— Arrollamiento para $N = 36$ y $2p = 8/4$ polos 205
— Arrollamiento para $N = 36$ y $2p = 12/6$ polos 206

V. TABLAS Y ESQUEMAS DE CONEXIONES

— Tabla de conexiones para arrollamientos de polos consecuentes, con $2p = 4$ 208
— Tabla de conexiones para arrollamientos de polos consecuentes, con $2p = 6$ 208
— Tabla de conexiones para arrollamientos de polos consecuentes, con $2p = 8$ 209
— Tabla de conexiones para arrollamientos de polos consecuentes, con $2p = 10$ 210
— Tabla de conexiones para arrollamientos de polos consecuentes, con $2p = 12$ 211
— Tabla de conexiones para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 2$. 212
— Tabla de conexiones para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 4$. 212
— Tabla de conexiones para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 6$. 213
— Tabla de conexiones para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 8$. 214
— Tabla de conexiones para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 10$. 215
— Tabla de conexiones para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 12$. 216
— Esquemas de conexión para arrollamientos de polos consecuentes, con $2p = 4$ 217
— Esquemas de conexión para arrollamientos de polos consecuentes, con $2p = 6$ 220
— Esquemas de conexión para arrollamientos de polos consecuentes, con $2p = 8$ 222
— Esquemas de conexión para arrollamientos de polos consecuentes, con $2p = 10$ 227
— Esquemas de conexión para arrollamientos de polos consecuentes, con $2p = 12$ 229
— Esquemas de conexión para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 2$ 235
— Esquemas de conexión para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 4$ 238
— Esquemas de conexión para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 6$ 243
— Esquemas de conexión para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 8$ 249
— Esquemas de conexión para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 10$ 254
— Esquemas de conexión para arrollamientos de polos alternados, con $2p = 12$ 262

TERCERA PARTE

I. CONDUCTORES Y AISLAMIENTOS

1. Introducción 275
2. Aislamientos, propiedades; clasificación térmica 275
3. Aislamientos de los conductores 276
4. Diversos aislamientos de conductores 276
5. Aislamientos de ranuras y fases 278
6. Cuñas de cierre. 279
7. Aislantes de cabezas, y aislantes y conductores para salida a bornes . . 279
8. Impregnación de los arrollamientos; su objeto 280
9. Barnices aislantes; propiedades. 280
10. Clasificaciones de los barnices aislantes 280
11. Control de un barniz aislante 281
12. Impregnación por inmersión. 282
13. Impregnación bajo vacío y presión 283
14. Curvas de secado 284
15. Stands de impregnación. 284
16. Hornos de secado 284
17. Precauciones a tener en cuenta en la construcción e impregnación de arrollamientos 285
18. Cómo manipular un barniz 285
19. Cómo controlar si se ha impregnado bien. 286

II. RECEPCION. REVISION. DESMONTAJE Y TOMA DE DATOS

1. Introducción 288
2. Recepción de la máquina 288
3. Revisión de la máquina 289
4. Desmontaje y toma de datos 290
5. Modo de desmontar el arrollamiento de una máquina. 294
6. Toma de datos de las conexiones 294
7. Boletín de trabajo 296
8. Coste total a facturar 297

III. PROCESOS DEL BOBINADO DE MAQUINAS ELECTRICAS

1. Introducción 298
2. Arrollamientos insertados hilo a hilo 298
3. Devanado de bobinas y grupos 298
4. Operación del devanado de bobinas 299
5. Máquinas para devanar bobinas y grupos 302
6. Aislamiento de las ranuras de la máquina 304
7. Factor de aprovechamiento de la ranura 306
8. Inserción de las bobinas y grupos 307
9. Aislamiento entre fases. 309
10. Verificación de las conexiones pertinentes 310
11. Ligadura de las cabezas de bobinas 311
12. Ensayo eléctrico del aislamiento 312
13. Impregnación y secado 313

IV. AVERIAS, SU LOCALIZACION Y REPARACION

1. Introducción 314
2. Al conectar el motor a la red, éste no arranca 314
3. El motor arranca con dificultad. La velocidad baja mucho con la carga . 314
4. El motor arranca de golpe 315
5. El motor zumba al arrancar. La corriente del estator oscila durante la marcha del motor 315
6. El motor arranca bien, pero marcha irregularmente 315
7. El motor marcha muy despacio. 315
8. El motor se calienta en exceso. 315
9. Otras anomalías. 316
10. Causas exteriores al motor, localización y corrección 316
11. Causas mecánicas posibles, localización y corrección 320
12. Causas eléctricas posibles, localización y corrección 322
13. Resumen conjunto de averías 329

V. FACTOR DE BOBINADO

1. Introducción 331
2. Influencia del factor de bobinado en el cálculo 331
3. Factores de los que depende el factor total de bobinado 332
4. Factor de acortamiento del paso 332
5. Paso acortado más conveniente. 333
6. Factor de distribución 334
7. Factor de acortamiento de zona 334
8. El acortamiento de zona como medio para mejorar el arranque . . . 335
9. Cálculo numérico del factor de bobinado 336

VI. MODIFICACIONES EN LOS MOTORES TRIFASICOS

1. Introducción 338
2. Cambio de tensión en bornes permaneciendo constantes el número de polos y la frecuencia 338
3. Casos particulares del epígrafe anterior 340
4. Cambio de frecuencia permaneciendo constante el número de polos . . 340
5. Variación del número de polos permaneciendo constantes la tensión y la frecuencia 342
6. Resumen de algunas consideraciones importantes 343

motores de corriente alterna

PRIMERA PARTE

I. Electrotecnia aplicada a los devanados

II. Máquinas eléctricas rotativas

III. Corrientes alternas

IV. Corrientes alternas polifásicas

V. Máquinas eléctricas rotativas para corrientes trifásicas

VI. Componentes de un arrollamiento. Datos para su ejecución

VII. Plan del arrollamiento y clasificación de los arrollamientos de corriente alterna

VIII. Método de la estrella de ranuras para determinar el plan del arrollamiento

IX. Paso de la estrella de ranuras al plan del arrollamiento

X. Parte I: Condiciones de ejecución de los arrollamientos

Parte II: Arrollamientos a dos capas con $N/6$ no entero

Parte III: Arrollamientos mixtos

XI. Conexiones de los arrollamientos trifásicos

XII. Motores asincrónicos de dos velocidades

CAPITULO I

ELECTROTECNIA APLICADA A LOS DEVANADOS

1. Introducción

En este primer capítulo expondremos, entre otros puntos, las magnitudes esenciales que entran en juego en el cálculo y reparación de los devanados de máquinas eléctricas, así como las leyes fundamentales que relacionan entre sí dichas magnitudes.

2. Intensidad de corriente eléctrica

Es la cantidad de electricidad que atraviesa un material conductor durante un tiempo unidad, por ejemplo, durante un segundo.

La intensidad de corriente está formada por el movimiento de los propios electrones del conductor. Dichos electrones se desplazan a lo largo del conductor según una dirección determinada.

La intensidad de corriente se representa por la letra *I*, y se mide en Amperios, unidad que se representa por la letra A.

3. Conductores y aislantes

El bobinador trabaja esencialmente con dos materiales diferentes: conductores y aislantes.

Materiales conductores son aquellos que permiten el paso de la corriente eléctrica.

En los devanados de las máquinas eléctricas rotativas, se utiliza preferentemente el cobre como material conductor. En la mayoría de las aplicaciones, el cobre interviene en forma de hilo de sección redonda, recubierto de una delgada capa de esmalte (aislante) que impide el contacto con los hilos contiguos o con las chapas del rotor o estator.

Los materiales que no permiten el paso de corriente a su través se llaman no conductores. Los aislantes son materiales no conductores que, además, tienen otras propiedades, como se verá en su lugar.

4. Densidad de corriente eléctrica

Este es un concepto importante, ya que muchas máquinas eléctricas se calientan demasiado, e incluso se averían, por no haber atendido al excesivo valor de la densidad de corriente.

La intensidad de corriente que atraviesa un conductor, lo hace a través de toda la sección del conductor. Así, es lógico, que cuanto mayor es la sección de dicho conductor, más facilidad de paso tiene la corriente.

Si denominamos s a la sección del conductor desnudo (o sea, sin contar el esmalte), se define como densidad de corriente que atraviesa el conductor a:

$$\text{densidad} = I/s$$

Ejemplo:

Si por un conductor de sección $s = 6$ mm², circula una corriente de 24 A, la densidad de corriente será:

$$\text{densidad} = 24/6 = 4 \text{ A/mm}^2$$

Ejemplo:

La densidad de corriente en un conductor es de $d = 4$ A/mm². Calcular la intensidad I que circule por dicho conductor si su sección es $s = 2{,}01$ mm². Se tiene:

$$I = d \cdot s = 4 \times 2{,}01 = 8{,}04 \text{ A}$$

Como hemos dicho, los conductores no pueden soportar, permanentemente, densidades de corriente exageradas, porque se producen calentamientos inadmisibles, bajando el rendimiento de la máquina y pudiendo llegar a averiarse.

5. Máxima densidad de corriente admisible

En cada caso práctico, existe una máxima densidad de corriente admisible, valor que no se debe rebasar.

Para trabajar con densidades de corriente aceptables, es necesario emplear conductores de sección suficiente, o disponer varios conductores en paralelo (ver §§ 11 y 12).

Si conocemos el valor máximo admisible para la densidad de corriente d, y sabemos cuál es el valor de la intensidad I, se puede calcular la mínima sección necesaria para el conductor mediante:

$$\text{sección mínima } s = I/d$$

Ejemplo:

Si la máxima densidad de corriente admisible en un conductor atravesado por 30 A es de 6 A/mm², la mínima sección del conductor a elegir será:

$$s = 30/6 = 5 \text{ mm}^2$$

Si no existe un conductor de tal sección, o no está a disposición en el taller, se deberá tomar el conductor de sección inmediatamente superior a la calculada como mínima. O procurar dicha sección mediante conductores en paralelo (§§ 11 y 12).

Para la densidad máxima de corriente admisible no se puede dar un valor numérico válido para todos los casos, sino que hay que atender a cada máquina en particular.

Si, por ejemplo, un motor es completamente cerrado y carece de otra ventilación que la natural, la densidad de corriente admisible en sus conductores será pequeña. Si, en cambio, el motor es de construcción abierta y lleva refrigeración, podrá admitirse un valor más elevado para la densidad de corriente.

Aunque, según se ha dicho, hay que estudiar en cada caso particular el valor máximo admisible para la densidad de corriente, a título solamente de orientación se puede dar como densidad máxima de corriente:

$d = 3$ A/mm² en motores sin refrigeración
$d = 6$ A/mm² en motores con refrigeración

Los valores con que se opera oscilan en la práctica entre 2 y 8 A/mm², pudiendo llegar a ser mayores en máquinas grandes.

6. Relación entre diámetro y sección

Aunque esta relación aparece en tablas a disposición de todos los talleres (ver Tabla I al final del capítulo), el operario bobinador debe poder calcular la sección de un conductor dado su diámetro, y viceversa.

Si D es el diámetro y s la sección del conductor, entre ambas magnitudes existe la relación:

$$s = \pi D^2/4 \text{, donde} \qquad \pi = 3{,}14$$

Ejemplo:

El diámetro de un conductor desnudo es de 2 mm. La sección del mismo será:

$$s = \pi \cdot 2^2/4 = \pi \cdot 2 \times 2/4 = 3{,}14 \text{ mm}^2$$

Si lo que se conoce es la sección s, y se quiere calcular el diámetro D, la primera ecuación puede expresarse de la forma:

$$D = \sqrt{4s/\pi}$$

Ejemplo:

La sección s requerida para un conductor es de $s = 12{,}56$ mm². El diámetro de dicho conductor será:

$$D = \sqrt{4 \times 12{,}56/\pi} = \sqrt{16} = 4 \text{ mm}$$

7. Resistencia óhmica; resistividad

Incluso los buenos conductores, como el cobre, ofrecen cierta resistencia a ser atravesados por corrientes eléctricas. Esta oposición se llama resistencia óhmica, y se mide en Ohmios.

La resistencia óhmica se representa por la letra R. Su unidad de medida, el Ohmio, se representa por la letra griega Ω (omega).

La resistencia de un conductor es mayor cuanto más longitud L tiene dicho conductor, y menor cuanto mayor es la sección s del conductor.

Además de la longitud L y de la sección s del conductor, en el valor de la resistencia interviene otro factor, llamado resistividad ρ (ro), que tiene un valor característico para cada material a determinada temperatura.

Para los conductores de cobre empleados en los devanados, la resistividad ρ vale, a 20° C: 0,0169 Ω/m/mm².

La resistencia óhmica R de un conductor de resistividad ρ, longitud L y sección s, queda determinada por la fórmula:

$$R = \rho \cdot L/s$$

Ejemplo:

La resistencia de un conductor de cobre puro, a 20° C, que tiene una longitud de 200 m y una sección de 10 mm², es:

$$R = 0{,}0169 \times 200/10 = 0{,}338 \ \Omega$$

Si, de un conductor, conocemos su resistencia R, su resistividad ρ, y su sección s, se puede saber cuál es su longitud mediante la fórmula:

$$L = R \cdot s/\rho$$

Ejemplo:

La resistencia de un conductor de cobre puro, a 20° C, es de 5 Ω, siendo su sección de 8 mm². La longitud de dicho conductor es, pues:

$$L = 5 \times 8/0{,}0169 = 2367 \text{ m}$$

Asimismo, conocida la resistencia R de un conductor, su resistividad ρ, y su longitud L, se puede determinar cuál es su sección mediante la fórmula:

$$s = \rho \cdot L/R$$

Ejemplo:

La resistencia de un conductor de cobre puro, a 20° C, es de 7 Ω; siendo su longitud de 3000 m. La sección de dicho conductor es, pues:

$$s = 0{,}0169 \times 3000/7 = 7{,}2 \text{ mm}^2$$

8. Tensión eléctrica

Se denomina tensión eléctrica, o diferencia de potencial (simplificadamente, d.d.p.) al desnivel eléctrico existente entre dos puntos cualquiera de un conductor.

Dicho desnivel eléctrico consiste en un exceso de electrones en uno de los puntos del conductor, y en una falta de electrones en el otro punto considerado. En estas condiciones, entre ambos puntos del conductor existe una tensión eléctrica o, lo que es lo mismo, una d.d.p.

La tensión, o d.d.p., se representa por la letra V, y se mide en Voltios, unidad que también viene representada por la letra V.

9. Ley de Ohm

Entre la intensidad de corriente I, que circula por un circuito conductor cerrado, la diferencia de potencial V entre los extremos de dicho circuito, y la resistencia R del conductor comprendido entre los puntos mencionados, existe una importante relación que se llama ley de Ohm, y se expresa mediante la fórmula:

$$V = I \cdot R$$

Ejemplo:

La d.d.p. existente entre los extremos de un conductor de resistencia $R = 30$ Ω, recorrido por una intensidad de 2 A, es:

$$V = 2 \times 30 = 60 \text{ V}$$

La ley de Ohm se puede enunciar también diciendo que siempre que por un conductor de resistencia R circula una intensidad I, hay una *caída* de potencial V, entre los extremos de dicho conductor, cuyo valor es:

$$V = I \cdot R$$

Si es conocido el valor de la tensión V y de la resistencia R, la intensidad I se puede calcular de la ley de Ohm, obteniéndose:

$$I = V/R$$

Ejemplo:

En los extremos de un conductor, que forma parte de un circuito cerrado, hay una tensión de $V = 220$ V. Si la resistencia del conductor es de $R = 10$ Ω, la intensidad que circulará por el conductor es:

$$I = 220/10 = 22 \text{ A}$$

Asimismo, conocidas la tensión V y la intensidad I, la resistencia R se obtiene de la ley de Ohm según:

$$R = V/I$$

Ejemplo:

Calcular la resistencia óhmica de un conductor que es recorrido por una intensidad de $I = 3$ A cuando entre sus extremos se aplica una d.d.p. de $V = 90$ V.
Será:

$$R = 90/3 = 30 \text{ Ω}$$

10. Potencia perdida en un conductor atravesado por corriente

Siempre que un conductor de resistencia R es atravesado por una corriente de intensidad I, se pierde en el conductor una potencia eléctrica P de valor:

$$P = I^2 \cdot R$$

La potencia P se mide en vatios, unidad que se representa por la letra W. Una unidad derivada es el kilovatio (kW); se tiene que:

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$$

La potencia perdida P se manifiesta siempre como calor. En los aparatos de calefacción eléctrica, interesa que el valor P sea elevado. En las máquinas eléctricas, por el contrario, interesa que la potencia P disipada en los conductores sea muy baja, ya que calienta los devanados, e incluso puede deteriorarlos.

Ejemplo:

Calcular la potencia P perdida en un conductor de 30 Ω al ser recorrido por una corriente de 10 A. Se tiene:

$$P = 10^2 \times 30 = 10 \times 10 \times 30 = 3000 \text{ W} = 3 \text{ kW}$$

Haciendo uso de la ley de Ohm ($V = I \cdot R$), la potencia P se puede expresar en función de la tensión y la resistencia:

$$P = V^2/R$$

o en función de la tensión y la intensidad:

$$P = I \cdot V$$

Ejemplo:

Calcular la potencia perdida en un conductor, de un circuito cerrado, de resistencia $R = 6\ \Omega$, al serle aplicada una tensión de $V = 30$ V.

Se tiene:

$$P = 30^2/6 = 30 \times 30/6 = 900/6 = 150 \text{ W}$$

Ejemplo:

Calcular la potencia disipada en un conductor que, al serle aplicada una tensión de $V = 110$ V, es recorrido por una intensidad de corriente de $I = 20$ A.

Se tiene:

$$P = 20 \times 110 = 2200 \text{ W} = 2{,}2 \text{ kW}$$

11. Resistencias en serie

Varios conductores, por ejemplo los de resistencia R_1, R_2 y R_3, pueden montarse en serie (fig. 1*a* y *b*) conectándolos cada uno a continuación del anterior. En este caso, la intensidad I que atraviesa todos los conductores es, naturalmente, la misma.

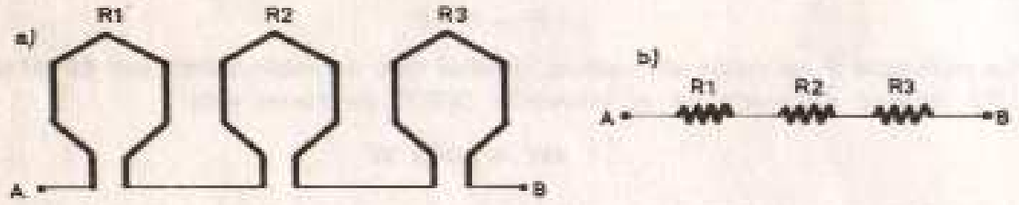


Fig. 1. — a) Resistencias R_1, R_2 y R_3 conectadas en serie. b) Esquema simplificado.

La resistencia total del tramo AB (fig. 1*a* y *b*) es la suma de todas las resistencias parciales que constituyen el tramo. O sea:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3$$

La diferencia de potencial V_{total} entre los puntos A y B, es la suma de las tensiones existentes entre cada conductor parcial. O sea, por la ley de Ohm:

$$V_{total} = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 = I\,(R_1 + R_2 + R_3) = I \cdot R_{total}$$

Ejemplo:

Calcular la resistencia total del conjunto de resistencias: $R_1 = 3\ \Omega$, $R_2 = 2\ \Omega$, $R_3 = 5\ \Omega$, al ser conectadas en serie.

Se tiene:

$$R_{total} = 3 + 2 + 5 = 10\ \Omega$$

Ejemplo:

Si la corriente que circula por los conductores en serie del ejemplo anterior es de 5 A, calcular la caída de potencial total.

Se tiene:

$$V_{total} = 5 \times 10 = 50 \text{ V}$$

Ejemplo:

Calcular las caídas de tensión en cada uno de los conductores en serie del ejemplo anterior.

Se tiene:

En el conductor de resistencia R_1: $V_1 = I \cdot R_1 = 5 \times 3 = 15$ V
En el conductor de resistencia R_2: $V_2 = I \cdot R_2 = 5 \times 2 = 10$ V
En el conductor de resistencia R_3: $V_3 = I \cdot R_3 = 5 \times 5 = 25$ V

Se puede comprobar que la suma de las caídas de tensión parciales, $V_1 + V_2 + V_3 = 50$ V, es igual a la tensión V_{total}.

12. Resistencias en paralelo

Varios conductores, por ejemplo los de resistencias R_1, R_2 y R_3, pueden también ser conectados en paralelo o derivación, disponiéndolos tal como representa la figura 2*a* y *b*.

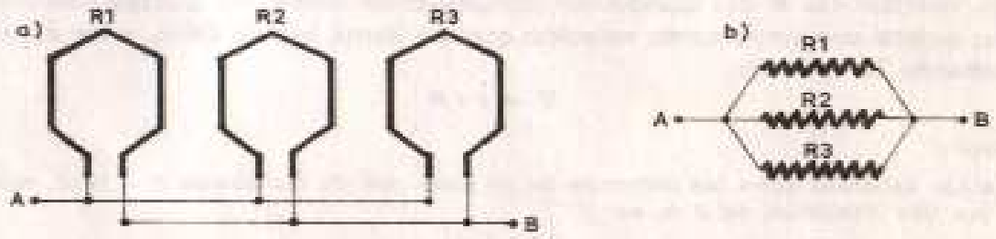


Fig. 2. — Resistencias R_1, R_2 y R_3 conectadas en paralelo. b) Esquema simplificado.

Entonces, la resistencia total entre los extremos A y B (fig. 2*a* y *b*) se obtiene de la expresión:

$$1/R_{total} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

Ejemplo:
Si las resistencias $R_1 = 3\ \Omega$, $R_2 = 2\ \Omega$ y $R_3 = 5\ \Omega$ se conectan en paralelo, la resistencia total que presenta el conjunto es:

$$1/R_{total} = 1/3 + 1/2 + 1/5 = 0{,}333 + 0{,}500 + 0{,}200 = 1{,}033$$

de modo que la resistencia total vale:

$$R_{total} = 1/1{,}033 = 0{,}968\ \Omega.$$

El potencial V entre los extremos de cada conductor parcial es, como se desprende de la figura 2, el mismo para todos.

Sin embargo, por cada resistencia circulan intensidades diferentes:

Por R_1 circula: $I_1 = V/R_1$
Por R_2 circula: $I_2 = V/R_2$
Por R_3 circula: $I_3 = V/R_3$

La corriente total que entra en el nudo A, y sale por el nudo B, es:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 = V/R_{total}$$

Ejemplo:

Si el potencial aplicado entre los puntos A y B (fig. 2) es de $V = 150$ V, las corrientes que circulan por las resistencias R_1, R_2 y R_3 del ejemplo anterior son:

Por R_1 $I_1 = 150/3 = 50$ A
Por R_2 $I_2 = 150/2 = 75$ A
Por R_3 $I_3 = 150/5 = 30$ A

La corriente total se puede obtener de $I_{total} = V/R_{total}$, o de la suma de las corrientes parciales: $I_{total} = I_1 + I_2 + I_3$.

Se puede comprobar que, por ambos métodos, se obtiene $I_{total} = 155$ A.

13. Empleo práctico de las conexiones en paralelo

Cuando varios conductores de secciones s_1, s_2, s_3, ..., se conectan en paralelo, equivalen a un conductor único cuya sección total fuera:

$$s_{total} = s_1 + s_2 + s_3 + \ldots$$

Esta interesante propiedad permite resolver, en la práctica del taller de bobinado, problemas cotidianos semejantes al que expone el siguiente ejemplo.

Ejemplo:

Se necesita construir una bobina por la cual ha de circular una corriente de 8,5 A, siendo la máxima densidad de corriente admisible $d = 3$ A/mm^2.
La sección mínima necesaria para el conductor que constituya dicha bobina será:

$$s = I/d = 8{,}5/3 = 2{,}83\ \text{mm}^2$$

Una sección tal corresponde a un hilo redondo de diámetro D:

$$D = \sqrt{4s/\pi} = \sqrt{4 \cdot 2{,}83/3{,}14} = \sqrt{3{,}61} = 1{,}90\ \text{mm}$$

Si en el taller no se dispone de hilo de tal diámetro, o se considera que dicho grosor es incómodo de arrollar por ser poco flexible, es siempre posible sustituir el conductor de 1,90 mm por dos o más hilos conectados, en paralelo, con tal que la suma de las secciones de dichos hilos sea igual, como mínimo, a la sección total que se precisa.

Así, por ejemplo, es posible tomar en nuestro caso 2 hilos de $D = 1{,}35$ mm, conectándolos en paralelo, ya que se tiene que la sección de cada uno de ellos es:

$$s_1 = s_2 = \pi \cdot D^2/4 = 3{,}14 \cdot 1{,}35^2/4 = 1{,}43\ \text{mm}^2$$

y, por tanto, al conectarlos en paralelo, se tendrá una sección total:

$$s_{total} = s_1 + s_2 = 1{,}43 + 1{,}43 = 2{,}86\ \text{mm}^2$$

que es un poco mayor que la necesaria y es, pues, válida.

También sería posible sustituir el hilo de $D = 1{,}90$ mm por tres cables de $D = 1{,}10$ mm cada uno, conectados en paralelo. En efecto, se tiene:

$$s_1 = s_2 = s_3 = \pi \cdot D^2/4 = 3{,}14 \cdot 1{,}10^2/4 = 0{,}950\ \text{mm}^2$$

de modo que, en paralelo, se alcanza una sección total:

$$s_{total} = s_1 + s_2 + s_3 = 0{,}95 + 0{,}95 + 0{,}95 = 2{,}85\ \text{mm}^2$$

sección que también es aceptable.

No es imprescindible que los hilos en paralelo tengan el mismo diámetro. Teóricamente podrían tener diámetros cualesquiera; sin embargo, para que la intensidad que atraviesa todos los hilos en paralelo sea la misma o muy semejante, se acostumbra a escoger los hilos en paralelo de diámetros iguales o muy parecidos.

En el problema anterior, la corriente que pasa por cada uno de los dos hilos en paralelo de diámetros $D = 1{,}35$ mm, es la mitad de la intensidad total, o sea:

$$I_1 = I_2 = I/2 = 8{,}5/2 = 4{,}25\ \text{A}$$

Y en el caso de sustitución por tres hilos en paralelo de diámetros $D = 1{,}10$ mm, la corriente que atraviesa cada hilo es la tercera parte de la total, o sea:

$$I_1 = I_2 = I_3 = 8{,}5/3 = 2{,}83\ \text{A}$$

Se puede comprobar que, en ambos casos, la densidad de corriente que soporta cada uno de los hilos no es superior a la máxima admisible.

A continuación se exponen dos tablas de utilidad práctica. La tabla 1 presenta las secciones, pesos en g/m, longitudes en m/kg y resistencias en Ω/kg y Ω/km correspondientes a los hilos de diámetros normales (entre los de cobre esmaltados). La tabla 2 presenta las posibilidades de sustitución de un hilo de diámetro D por varios hilos de diámetros iguales o muy parecidos entre sí, conectados en paralelo.

Tabla 1: Caracteristicas de los hilos de cobre

Diámetro mm	Sección mm²	Peso g/m	Longitud m/kg	Resistencia Ω/kg a 0° C	Resistencia Ω/km a 0° C
0,04	0,0012	0,0112	89410	136800	12714
0,05	0,0020	0,0175	57220	455600	8158
0,06	0,0028	0,0252	39730	224500	5664
0,07	0,0038	0,0342	29190	121200	4151,4
0,08	0,0050	0,0447	22350	71360	3178,4
0,09	0,0064	0,0566	17660	44550	2511,3
0,1	0,0079	0,0699	14306	29100	2034,2
0,2	0,0314	0,2796	3576	1817	508,230
0,3	0,0707	0,6291	1589	359,280	226,020
0,4	0,1257	1,1184	894,1	113,580	127,140
0,5	0,1963	1,7475	572,2	46,560	81,580
0,6	0,2827	2,5164	397,3	22,450	56,540
0,7	0,3848	3,4251	291,9	12,120	41,514
0,8	0,5027	4,4736	223,5	7,136	31,784
0,9	0,6362	5,6619	176,6	4,455	25,113
1,0	0,7854	6,9900	143,0	2,910	20,342
1,1	0,9503	8,4580	118,2	2,004	16,611
1,2	1,1310	10,066	99,34	1,409	14,126
1,3	1,3273	11,813	84,65	1,025	12,036
1,4	1,5394	13,700	72,99	0,761	10,378
1,5	1,7671	15,728	63,58	0,579	9,040
1,6	2,0106	17,895	55,88	0,445	7,946
1,7	2,2698	20,201	49,50	0,349	7,038
1,8	2,5447	22,646	44,15	0,277	6,278
1,9	2,8353	25,234	39,62	0,223	5,634
2,0	3,1416	27,960	35,76	0,181	5,085
2,1	3,4636	30,828	32,44	0,150	4,612
2,2	3,8013	33,832	29,55	0,124	4,202
2,3	4,1548	36,977	27,04	0,103	3,845
2,4	4,5239	40,263	24,83	0,088	3,531
2,5	4,9087	43,688	22,89	0,074	3,254
2,6	5,3093	47,253	21,16	0,063	3,009
2,7	5,7256	50,957	19,62	0,054	2,790
2,8	6,1575	54,802	18,24	0,047	2,594
2,9	6,6052	58,786	17,01	0,041	2,416
3,0	7,0686	62,910	15,89	0,036	2,255
3,1	7,5477	67,174	14,88	0,032	2,116
3,2	8,0425	71,578	13,97	0,027	1,988
3,3	8,5530	76,122	13,13	0,024	1,867
3,4	9,0792	80,805	12,37	0,021	1,759
3,5	9,6211	85,628	11,67	0,019	1,660
3,6	10,1788	90,591	11,03	0,017	1,569
3,7	10,7521	95,675	10,43	0,015	1,485
3,8	11,3412	100,92	9,90	0,013	1,408
3,9	11,9459	106,26	9,40	0,012	1,337
4,0	12,5664	111,84	8,94	0,011	1,271
4,1	13,2025	117,48	8,51	0,010	1,210
4,2	13,8544	123,26	8,11	0,009	1,153
4,3	14,5220	129,22	7,73	0,0085	1,100
4,4	15,2053	135,28	7,39	0,0077	1,050
4,5	15,9043	141,51	7,06	0,0071	1,004
4,6	16,6190	147,82	6,75	0,0065	0,961
4,7	17,3494	154,32	6,47	0,0059	0,920
4,8	18,0956	161,00	6,20	0,0054	0,882
4,9	18,8574	167,76	5,95	0,0050	0,847
5,0	19,6350	174,74	5,72	0,0046	0,813

Tabla 2: Equivalencia de hilos en paralelo

Sección mm²	1 hilo ⌀ mm	2 hilos ⌀ mm	3 hilos ⌀ mm	4 hilos ⌀ mm	5 hilos ⌀ mm
0,0490	0,25	0,17-0,18	0,14-0,15		
0,0616	0,28	0,20	0,16		
0,0707	0,30	0,21	0,17-0,18		
0,0962	0,35	0,25	0,20		
0,1257	0,40	0,28	0,23		
0,1590	0,45	0,32	0,25-0,26		
0,1963	0,50	0,35	0,28-0,30		
0,2376	0,55	0,40	0,32		
0,2827	0,60	0,42	0,35		
0,3318	0,65	0,45-0,48	0,38		
0,3848	0,70	0,50	0,40		
0,5027	0,80	0,55-0,56	0,45		
0,6362	0,90	0,64-0,65	0,50-0,52		
0,7857	1,0	0,70	0,58		
0,8503	1,1	0,78-0,80	0,64-0,65		
1,1310	1,2	0,85	0,70		
1,3273	1,3	0,90-0,92	0,75		
1,5394	1,4	1,0	0,80		
1,7671	1,5	1,05	0,85		
2,0106	1,6	1,15	0,90		
2,2698	1,7	1,20	1,00		
2,5447	1,8	1,25	1,05		
2,8353	1,9	1,35	1,10		
3,1416	2,0	1,40	1,15		
3,4636	2,1	1,50	1,20		
3,8013	2,2	1,55	1,25		
4,1548	2,3	1,60	1,30		
4,5239	2,4	1,70	1,40		
5,3093	2,6	1,85	1,50		
5,7256	2,7	1,90	1,55		
6,1575	2,8	2,00	1,60		
6,6052	2,9	—	1,70		
7,0686	3,0	2,10	1,70-1,80	1,50	
7,5477	3,1	2,20	1,90	—	
8,0425	3,2	2,25	1,80-1,85	1,60	
8,5530	3,3	2,30	—	—	1,50
9,0792	3,4	2,40	2,00	1,70	1,55
9,6211	3,5	—	2,05	—	—
10,1788	3,6	2,50	2,10	1,80	1,60
10,7521	3,7	2,60	—	—	—
11,3412	3,8	2,70	2,20	1,90	1,70
12,5664	4,0	2,80	2,30	2,00	—
13,2025	4,1	2,90	—	—	1,80
13,8544	4,2	—	—	2,10	—
14,5220	4,3	3,00	—	—	1,90
15,2053	4,4	3,10	2,50	2,20	2,00
15,9043	4,5	3,20	2,60	—	—
16,6190	4,6	3,30	—	2,30	—
17,3494	4,7	—	2,70	—	2,10
18,0956	4,8	3,40	—	2,40	—
18,8574	4,9	—	—	—	2,20
19,6350	5,0	3,50	—	2,50	—

CAPITULO II

MAQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS

1. Introducción

Las máquinas eléctricas son dispositivos capaces de transformar la energía eléctrica en energía de otro tipo, o viceversa. Se denominan rotativas las máquinas que para su funcionamiento necesitan que gire una de sus partes (por ejemplo: dinamos, alternadores, etc.). Las máquinas eléctricas que para funcionar no precisan de una parte giratoria, se llaman estáticas (por ejemplo: transformadores).

En este capítulo expondremos los fenómenos magnéticos y electromagnéticos esenciales en los que se apoya la explicación del funcionamiento de las máquinas eléctricas rotativas. Asimismo analizaremos las partes fundamentales que componen dichas máquinas.

2. Campo magnético. Imanes

De todos es sabido que ciertos materiales, llamados magnéticos, tienen la propiedad de atraer el hierro y otros compuestos férricos.

Dando formas adecuadas a los materiales magnéticos, se fabrican los imanes utilizados en la práctica.

Una aguja de hierro, al ser situada cerca de un imán, se orienta según una determinada dirección. Alejando dicha aguja de las proximidades del imán, la aguja pierde su orientación anterior.

Este fenómeno se explica admitiendo que el material magnético del imán crea a su alrededor un campo invisible de fuerzas capaces de actuar sobre compuestos de hierro. Dicho campo, llamado campo magnético, es más intenso en las cercanías del imán, y va perdiendo intensidad según se aleja del imán, hasta llegar a ser prácticamente nulo.

La existencia de dicho campo magnético invisible puede ponerse de manifiesto situando una brújula en diversos puntos próximos al imán. La figura 3 muestra cómo dicha brújula se orienta cada vez, dibujando en conjunto determinadas líneas que van de un extremo (polo) a otro del imán.

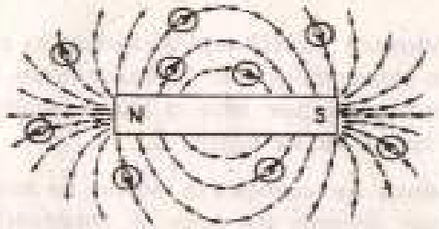


Fig. 3. — Orientación de una brújula en las proximidades de un imán; líneas de fuerza.

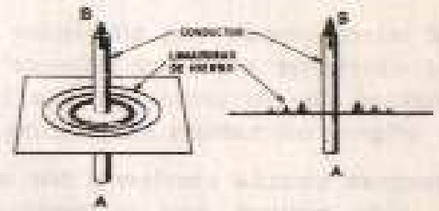


Fig. 4. — Limaduras de hierro orientadas por una corriente eléctrica; intensidad del campo.

Para facilitar el estudio de los campos magnéticos, se supone teóricamente la existencia de *líneas de fuerza* similares a las presentadas en la figura 3. Tales líneas se caracterizan por su dirección, sentido e intensidad. Las líneas de fuerza se cierran por el interior del imán, constituyendo así un circuito magnético.

3. Campo magnético originado por una corriente que circula por un conductor rectilíneo

Análogo fenómeno al que tiene lugar en las inmediaciones de un imán, se manifiesta en las proximidades de un hilo cuando éste es atravesado por una corriente eléctrica. La figura 4 muestra el aspecto que toman unas limaduras de hierro, dispuestas en un plano, al pasar una corriente por el conductor *AB* perpendicular al plano.

El campo magnético así originado es tanto más intenso cuanto mayor es la intensidad de la corriente que circula por el conductor.

La existencia de semejantes campos magnéticos se pone también de manifiesto cuando por dos conductores cercanos pasan corrientes eléctricas. Los campos magnéticos creados alrededor de cada hilo se influyen entre sí de tal modo que los conductores se atraen mutuamente (si son recorridos por corrientes del mismo sentido), o se repelen (cuando las corrientes son de sentido opuesto).

Este fenómeno hay que tenerlo en cuenta al bobinar una máquina eléctrica, cuidando de sujetar bien las cabezas de las bobinas del arrollamiento; de lo contrario, pueden aparecer en ellas esfuerzos mecánicos que, si no han sido previstos y compensados, perjudicarán el devanado.

4. Campo magnético originado por una corriente que pasa por un conductor circular

Del mismo modo que alrededor de un conductor rectilíneo atravesado por una corriente eléctrica aparece un campo magnético, al circular una intensidad de corriente por una bobina constituida por una o más espiras, se origina un campo magnético tal como muestra la figura 5.

Mientras circula corriente por la bobina, ésta se comporta como lo haría un imán natural, con la ventaja sobre este último de que la intensidad del campo magnético originado por la bobina puede incrementarse sin más que aumentar la corriente que pasa por la bobina, o, también, aumentando el número de espiras de la bobina, esto es, el número de vueltas del conductor.

5. Electroimanes

Si una bobina, tal como la citada en el epígrafe anterior, se monta sobre un núcleo de hierro, se tiene un electroimán (fig. 6).

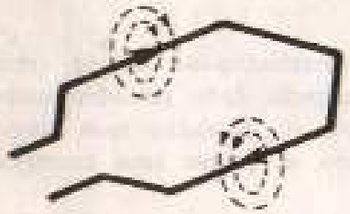


Fig. 5. — Campo magnético (de trazos) originado por una corriente que circula por una bobina.

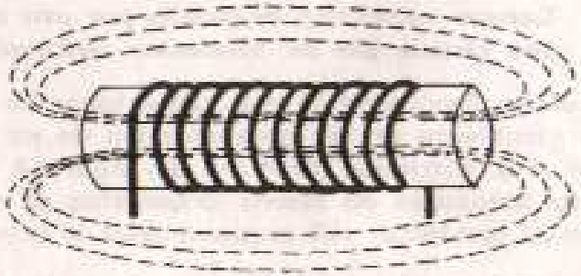


Fig. 6. — Electroimán: el núcleo de hierro canaliza y refuerza las líneas de campo magnético.

El núcleo de hierro abrazado por la bobina, no solamente actúa como sostén material de las espiras, sino que, además, robustece la acción del campo magnético que se genera al hacer pasar una corriente por la bobina, y canaliza las líneas de fuerza de dicho campo.

En las máquinas eléctricas rotativas, los campos magnéticos (imprescindibles para su funcionamiento) están originados por electroimanes, o sea, por núcleos de hierro (polos de la máquina) sobre los que se arrollan espiras.

6. Número de amperios-vuelta

Como hemos mencionado en el epígrafe 4, el campo magnético que genera un electroimán puede modificarse variando el valor de la intensidad I de corriente que atraviesa las espiras, o, también, variando el número de dichas espiras; es decir, poniendo más o menos vueltas del conductor alrededor del núcleo de hierro.

El producto $n \cdot I$ del número de espiras (vueltas) de la bobina por la intensidad de corriente se llama número de amperios-vuelta, y es un factor de importancia para el taller de bobinado.

Ejemplo:

Si una bobina consta de 500 espiras que son recorridas por una intensidad de corriente de $I = 4$ A, el número de amperios-vuelta es:

$$n \cdot I = 4 \times 500 = 2.000 \text{ A-v}$$

7. Flujo magnético

Se llama flujo magnético al número de líneas de fuerza que constituyen un circuito magnético. Se representa por la letra griega Φ (fi), y se mide en Maxwells.

8. Inducción magnética

Se define, para cada sección s del circuito magnético, como el cociente entre el flujo magnético que atraviesa dicha sección, y la sección misma. Se representa por la letra B, y se mide en Gauss.

De la definición se desprende que:

$$B = \Phi / s$$

Ejemplo:

Una sección de 50 cm², de un circuito magnético, es atravesada por un flujo magnético de $\Phi = 225.000$ Maxwells. La inducción en dicha sección será:

$$B = \Phi / s = 225\,000 / 50 = 4\,500 \text{ Gauss.}$$

9. Fenómenos electromagnéticos. Fuerza electromotriz inducida

Experimentalmente se comprueba que cuando se hace girar un conductor, como el que muestra la figura 7, en medio de un campo magnético, entre los extremos *A* y *B* del conductor se establece un desequilibrio eléctrico, o sea, una diferencia de potencial.

Este desequilibrio queda confirmado al cortocircuitar los extremos *A* y *B*, pues entonces pasa una corriente eléctrica por el conductor.

La causa que origina esta diferencia de potencial es la llamada fuerza electromotriz inducida, que se representa por la letra *E* y, al igual que la d.d.p., se mide en voltios.

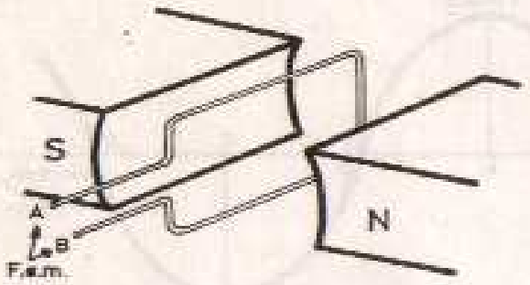


Fig. 7. — F.e.m. inducida en una espira que gira en un campo magnético. Instante en el que la espira abraza todo el flujo magnético.

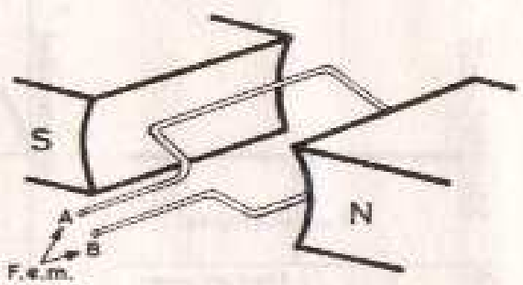


Fig. 8. — Instante en el que la espira solamente abraza parte del flujo. Algunas líneas de fuerza no pasan por dentro de la espira.

La fuerza electromotriz (simplificadamente: f.e.m.) se ha originado, en este caso, por un fenómeno electromagnético que se presenta siempre que se hace variar el número de líneas de fuerza (o sea, el flujo) que pasa a través de la sección que abraza un conductor situado en un campo magnético.

En la figura 7, cuando el conductor (arrollado como espira) se sitúa paralelo a las bases de los núcleos de hierro (polos), abraza todo el flujo del campo magnético, es decir, es atravesado por todas las líneas de fuerza que constituyen el campo.

Sin embargo, si se hace girar el conductor hasta la posición representada en la figura 8, se observa que ahora ya no abraza todas las líneas de fuerza, sino que algunas de ellas pasan por fuera de la espira.

Así pues, el flujo abrazado ha variado. Dicha variación habrá tenido lugar en un tiempo (segundos) igual al que ha tardado la espira en pasar de una a otra posición, según la velocidad de giro de la espira. Y es, precisamente, esta variación del flujo magnético en el tiempo, la que *induce* en la espira una fuerza electromotriz *E*.

El fenómeno expuesto es reversible; es decir, si a la espira situada en el campo magnético se le aplica una diferencia de potencial, la espira adquiere un movimiento de giro.

10. Generadores y motores eléctricos

Las máquinas eléctricas rotativas se clasifican, de acuerdo con la transformación que realizan, en generadores y motores.

En los generadores, la energía mecánica es transformada en eléctrica. Su funcionamiento se basa en el fenómeno electromagnético antes visto: A la espira mencionada se le aplica un movimiento de giro (esto es, una energía mecánica); entonces, en la espira se induce una f.e.m. (energía eléctrica), que es la que se aprovecha.

En los motores, la energía eléctrica es transformada en mecánica. Su funcionamiento se apoya igualmente en el fenómeno electromagnético descrito: Entre los extremos de la espira se aplica una diferencia de potencial (esto es, una energía eléctrica); entonces, la espira adquiere un movimiento de rotación (energía mecánica) que es el que se aprovecha.

11. Constitución esencial de los motores y generadores eléctricos

Desde el punto de vista mecánico, las máquinas eléctricas rotativas constan de dos partes esenciales:

— El estator:
  Que es la parte fija, y es solidario a la caja o carcasa de la máquina.
— El rotor:
  Que es la parte móvil de la máquina y, para poder girar, lleva un eje mecánico que se apoya en cojinetes.

Desde el punto de vista eléctrico y magnético, las máquinas eléctricas rotativas constan de dos devanados fundamentales:

— El devanado de excitación:
  Que, al ser recorrido por una intensidad de corriente, proporciona los amperios-vuelta precisos para crear el flujo magnético necesario. Se denomina, también, devanado inductor.
— El devanado inducido:
  Gracias al cual tiene lugar el fenómeno electromagnético que permite la transformación de la energía eléctrica en mecánica, o viceversa.

CAPITULO III

CORRIENTES ALTERNAS

1. Introducción

La ley de Ohm, tal como la hemos estudiado en el capítulo I, no es aplicable más que para corriente continua. En corriente alterna hay que atender a nuevos factores cuyo conocimiento se hace indispensable para todo técnico electricista.

En este capítulo procuraremos ofrecer un claro concepto de la corriente y tensión alternas, de su generación en las máquinas eléctricas rotativas, así como de otros conceptos y magnitudes de importancia.

2. Corriente continua

Cuando la intensidad de corriente que atraviesa un conductor es constante en sentido y valor durante todo el tiempo que circula, se dice que se trata de una corriente continua.

Si en unos ejes rectangulares tomamos en la vertical (ordenadas) los valores instantáneos de la intensidad de corriente, y en la horizontal (abscisas) los tiempos correspondientes, la representación de una corriente continua es la que muestra la figura 9.

Una corriente continua es la que, por ejemplo, proporciona una pila, o una batería. También puede ser obtenida con una máquina eléctrica rotativa.

Para transportar energía eléctrica desde un punto a otro situado a distancia considerable (kilómetros), es necesario disponer en el punto de origen de una diferencia de potencial muy elevada, ya que en el camino tienen lugar pérdidas.

Obtener corriente continua a un elevadísimo voltaje (necesario para un transporte eficaz y económico) es cuestión que presenta muchos problemas. Sin embargo, no sucede así con la corriente alterna ya que ésta, gracias al empleo de los transformadores, puede ser elevada de voltaje con toda facilidad. Por esta razón, todas las redes de distribución y transporte de energía eléctrica son hoy, prácticamente, de corriente alterna.

3. Corriente alterna

Cuando la intensidad de corriente que atraviesa un conductor es variable en sentido y valor durante todo el tiempo que circula, se dice que se trata de una corriente alterna.

La representación de la corriente alterna en un sistema de ejes rectangulares, es la que muestra la figura 10.

En dicha figura observamos que, partiendo de un valor inicial nulo $I = 0$, la corriente crece hasta alcanzar un valor máximo al cabo de OA segundos. Desde este instante, decrece su valor hasta anularse al cabo de $AB = OA$ segundos. Toma entonces valores negativos crecientes hasta alcanzar un valor máximo negativo al cabo de $BC = AB = OA$ segundos.

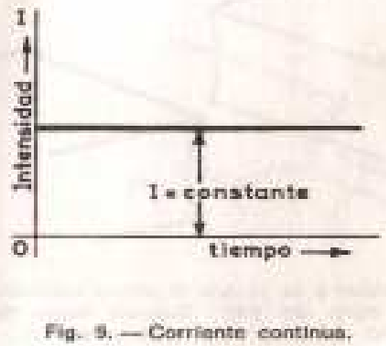


Fig. 9. — Corriente continua.

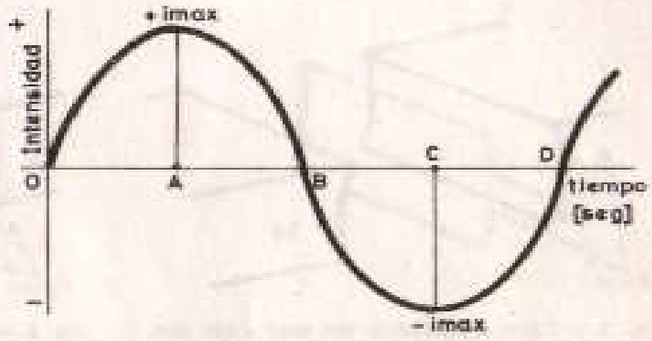


Fig. 10. — Corriente alterna (sinusoidal).

Desde este instante, van decreciendo los valores negativos de la intensidad, llegando a anularse al cabo de $CD = BC = AB = OA$ segundos.

A partir del punto D, las variaciones de la intensidad de corriente se repiten siguiendo una curva idéntica a la descrita desde O a D. Y así sucesivamente, durante toda la duración de la corriente.

La corriente alterna de la figura 10 se llama corriente alterna sinusoidal, porque la curva que la representa es una sinusoide.

Cuando por un conductor circula una corriente alterna, el valor instantáneo de la intensidad de corriente en cada punto del conductor es el mismo, pero varía según la curva de la figura 10, creciendo primero hasta un valor máximo, decreciendo después hasta anularse, tomando entonces valores negativos crecientes (o sea, la corriente circula ahora en sentido

contrario al anterior) hasta un máximo, para decrecer después hasta anularse, instante a partir del cual se repite el ciclo, y así, indefinidamente, mientras circule corriente.

4. Frecuencia de la corriente alterna

Atendiendo a la figura 10:
El tramo de curva comprendida entre el punto *O* y el *D*, es decir, el que abarca un ciclo completo (ya que a partir del punto *D* se repite el proceso), se llama período de la variación.

La frecuencia de la corriente alterna queda definida por la rapidez con que se repite cada período; concretamente, la frecuencia mide el número de períodos que quedan comprendidos en un tiempo de $t = 1$ segundo.

La frecuencia se representa por la letra *f*, y se mide en Hercios, unidad que se suele representar por Hz.

Si el tiempo que tarda una corriente alterna en desarrollar un período es de *T* segundos, la frecuencia de dicha corriente es de:

$$f = 1/T \text{ Hercios}$$

Ejemplo:

Si la duración del ciclo completo es de $T = 0{,}20$ segundos, la frecuencia de la corriente alterna es de:

$$f = 1/T = 1/0{,}20 = 5 \text{ Hz.}$$

Si se conoce el valor de la frecuencia *f*, se puede deducir la duración de cada período de la fórmula:

$$T = 1/f$$

Ejemplo:

Una frecuencia de $f = 50$ Hercios significa que en cada segundo se realizan 50 períodos. Así, la duración de cada período es:

$$T = 1/f = 1/50 = 0{,}020 \text{ seg.}$$

5. Generación de corrientes alternas

Consideremos, como ya vimos en el § 9 del capítulo anterior, una espira conductora situada en el campo magnético comprendido entre dos polos. Supongamos que la espira gira con un movimiento de rotación uniforme a una velocidad de $n = 300$ revoluciones por minuto (r.p.m.), o sea, de $300/60 = 5$ vueltas por segundo. En dar una vuelta completa, la espira tardará $1/5 = 0{,}20$ segundos.

Admitamos que, inicialmente, la espira se encuentra situada tal como muestra la figura 11, posición *a*, es decir, que no abraza ninguna línea de fuerza. El flujo abrazado es, pues, nulo.

Si la espira comienza a girar, por ejemplo en sentido contrario a las agujas del reloj, el flujo abrazado será cada vez mayor, hasta que la espira, al cabo de un cuarto de vuelta (o sea, de $t = 0{,}20/4 = 0{,}05$ seg.), encierra todas las líneas de fuerza (fig. 11, posición *b*). En estas condiciones, el flujo abrazado es máximo.

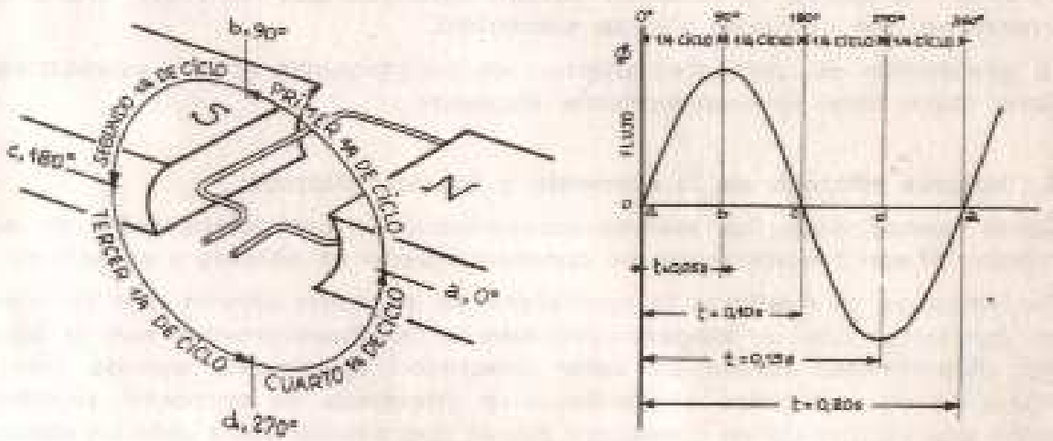


Fig. 11. — Variación del flujo magnético en una espira que gira entre dos polos. a) La espira no abraza flujo ($t = 0$). b) La espira abraza el flujo máximo al cabo de 1/4 de vuelta ($t = 0{,}05$ s). c) La espira no abraza flujo al cabo de 1/2 vuelta ($t = 0{,}10$ s). d) La espira abraza el flujo máximo al cabo de 3/4 de vuelta ($t = 0{,}15$ s).

Si la espira continua girando, el flujo abrazado comienza a decrecer, y continua disminuyendo hasta anularse cuando la espira ha dado media vuelta (o sea, al cabo de $t = 0{,}20/2 = 0{,}10$ seg.), como muestra la figura 11, posición *c*.

A partir de este punto, al continuar girando la espira, vuelve a aumentar el flujo abrazado (si bien, como las líneas de fuerza penetran ahora en la espira por su otra cara, consideramos negativos estos valores), creciendo hasta un valor máximo al cabo de dar 3/4 de vuelta (o sea, de $t = 0{,}15$ segundos), según se observa en la figura 11, posición *d*.

Y, por último, al concluir la espira su primera vuelta completa, el flujo decrece hasta anularse al cabo de $t = 0{,}20$ seg. La espira queda como en su

posición de partida (fig. 11, posición *a*), y el proceso se repite en las sucesivas vueltas.

Al representar sobre unos ejes rectangulares los valores instantáneos del flujo abrazado por la espira, encontramos que la representación es una sinusoide análoga a la del ejemplo del § 3.

La fuerza electromotriz inducida en la espira por el flujo alterno analizado, es asimismo una sinusoide.

Si, en vez de tratarse de una espira abierta, se cortocircuitan sus extremos, por la espira en rotación circula entonces una corriente. Dicha corriente es una corriente alterna sinusoidal.

La generación de corrientes alternas en las máquinas eléctricas rotativas, tiene como base lo anteriormente expuesto.

6. Valores eficaces de la corriente y tensión alternas

Como hemos visto, los valores instantáneos de una intensidad y de una tensión (f.e.m.) alternas varían constantemente en sentido y magnitud.

Sin embargo, si medimos la intensidad de corriente alterna que atraviesa un conductor con un amperímetro adecuado, observaremos que la aguja del amperímetro señala un valor constante. Igualmente sucede con la aguja de un voltímetro si medimos la diferencia de potencial existente entre dos puntos de un conductor por el que circula una corriente alterna.

La razón de ello es que, tanto el amperímetro como el voltímetro, no miden los valores instantáneos de la intensidad y la d.d.p., respectivamente, sino que miden los llamados *valores eficaces*.

El valor eficaz I_{ef} de una intensidad i de corriente alterna, es igual al valor de la intensidad de corriente continua que produciría los mismos efectos caloríficos.

O sea, por ejemplo, una intensidad eficaz de 1 A en corriente alterna origina el mismo calentamiento de una resistencia que produciría 1 A de corriente continua.

Análogamente, el valor de la tensión eficaz de una corriente alterna es igual al valor de la tensión de una corriente continua que produzca los mismos efectos caloríficos.

Por ejemplo, una lámpara funcionando con corriente continua a una tensión de 110 V, luciría con igual brillo que si estuviese conectada a una corriente alterna a 110 V eficaces.

En la práctica, se trabaja siempre con valores eficaces de la intensidad y tensión alterna, aunque no se mencione.

Entre los valores máximo y eficaz de una intensidad o tensión de corriente alterna sinusoidales existe la relación:

$$\text{Valor eficaz} = \text{Valor máximo}/1{,}41$$

Ejemplo:

Si el valor instantáneo máximo de una intensidad de corriente alterna sinusoidal es de $I_{máx.} = 31$ A, el valor eficaz $I_{ef.}$ de dicha intensidad es:

$$I_{ef.} = I_{máx.}/1{,}41 = 31/1{,}41 = 22 \text{ A}$$

Ejemplo:

Si el valor máximo de una tensión de corriente alterna sinusoidal es de $V_{máx.} = 500$ V, el valor eficaz $V_{ef.}$ de dicha d.d.p. es:

$$V_{ef.} = V_{máx.}/1{,}41 = 500/1{,}41 = 335 \text{ V}$$

En lo sucesivo, mientras no se indique lo contrario, se entenderá que los valores que se den para la intensidad y la tensión de corrientes alternas son los valores eficaces de las mismas. •

7. Desfase entre curvas sinusoidales

Se dice que las curvas sinusoidales *a* y *b* de la figura 12 están en fase, porque coinciden exactamente sus instantes de crecimiento, de valor máximo positivo, de disminución, de valor nulo, de crecimiento de valores negativos, etc.

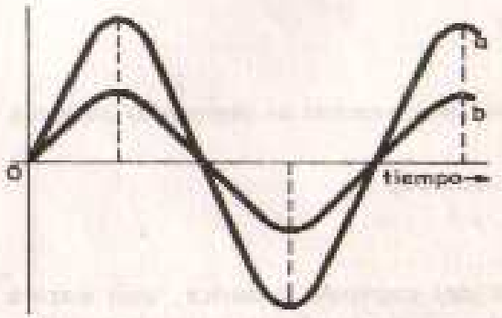


Fig. 12. — Las curvas a y b están en fase.

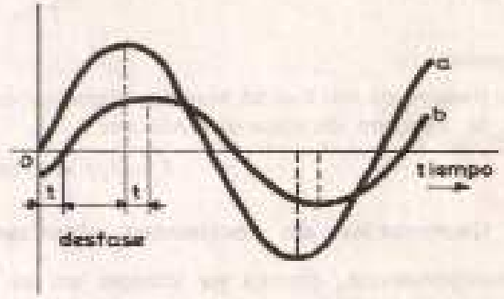


Fig. 13. — Las curvas a y b tienen desfase = t seg.

Por el contrario, las curvas *a* y *b* de la figura 13 se dice que están defasadas, ya que no coinciden los instantes mencionados anteriormente.

El desfase entre ambas curvas viene medido, en el eje de abscisas, por el valor del tiempo t comprendido entre los instantes de partida de cada sinusoide.

Dicho desfase puede, también, medirse en grados. Basta considerar que cada período corresponde a una vuelta completa (ver § 5), es decir, a 360°. Como la duración de un período es de T segundos (ver § 4), un desfase de t segundos equivale a un desfase de:

$$\text{desfase} = 360 \cdot t/T \text{ grados}$$

Ejemplo:

Dos curvas sinusoidales de la misma frecuencia $f = 50$ Hz están defasadas $t = 0{,}005$ segundos. Calcular su desfase en grados.
Se tiene que la duración de un período es:

$$T = 1/f = 1/50 = 0{,}020 \text{ seg.}$$

Por tanto, el desfase en grados es:

$$\text{desfase} = 360 \cdot t/T = 360 \cdot 0{,}005/0{,}020 = 90 \text{ grados.}$$

8. Resistencia óhmica pura, reactancias inductiva y capacitiva

Una resistencia óhmica pura es la que presenta un conductor rectilíneo al paso de la corriente alterna. Su valor quedó definido en el capítulo I § 6, y el adjetivo *pura* que ahora le asignamos significa que está exenta de toda reactancia inductiva o capacitiva, conceptos que estudiaremos seguidamente.

Cuando un conductor solamente presenta una resistencia óhmica pura, entre la intensidad I de corriente alterna que lo atraviesa y la tensión V de corriente alterna existente entre los extremos del conductor, no hay desfase alguno. Es decir, las curvas sinusoidales representativas de la intensidad I y de la tensión V se encuentran siempre en fase.

Una reactancia inductiva pura es la resistencia que presenta un conductor muy grueso (o sea, de resistencia óhmica prácticamente nula), arrollado sobre un núcleo magnético, al paso de la corriente alterna.

La reactancia inductiva se mide también en Ohmios, pero, así como la resistencia óhmica pura tiene un valor constante cualquiera que sea la frecuencia de la corriente alterna, el valor de la reactancia inductiva varía con el valor de la frecuencia de dicha corriente.

Cuando un conductor presenta una reactancia inductiva pura, entre la corriente alterna de intensidad I que lo atraviesa y la tensión V alterna existente entre los extremos del conductor, existe un desfase de 90 grados. Es decir (fig. 14), la intensidad I se encuentra 90 grados atrasada respecto a la tensión V.

Una reactancia capacitiva es la resistencia que, por ejemplo, presenta un conductor en el que se ha intercalado un condensador.

La reactancia capacitiva se mide también en Ohmios, y, como la reactancia inductiva, su valor es función de la frecuencia f de la corriente alterna.

Cuando un conductor presenta una reactancia capacitiva pura, entre la corriente alterna de intensidad I que lo atraviesa y la tensión alterna V existente entre los extremos del conductor, existe también un desfase de 90 grados, pero ahora (fig. 15) es la tensión la que se encuentra atrasada respecto a la intensidad.

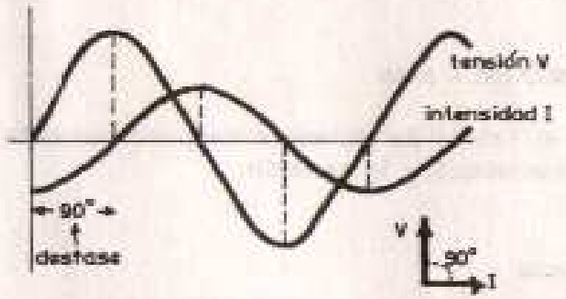


Fig. 14. — La intensidad I está 90° retrasada respecto a la tensión V, en toda reactancia inductiva pura.

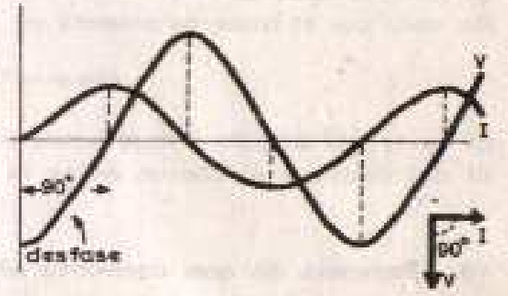


Fig. 15. — La tensión V está 90° retrasada respecto a la intensidad I, en toda reactancia capacitiva pura.

En los devanados de las máquinas eléctricas rotativas de corriente alterna, existen siempre resistencias óhmicas, reactancias inductivas y reactancias capacitivas.
Esto indica que entre la intensidad de la corriente alterna que circula por el arrollamiento, y la tensión alterna en bornes de la máquina, existirá siempre un desfase.

9. Factor de potencia

Así como en corriente continua la potencia es el producto de la intensidad I por la tensión V, en corriente alterna no se puede obtener de esta manera, debido al desfase existente entre la intensidad y la tensión.

Si, en una máquina eléctrica de corriente alterna, medimos durante su funcionamiento el valor de la potencia, con un vatímetro, comprobaremos que dicho valor resulta diferente del obtenido multiplicando la intensidad de corriente, medida con un amperímetro, por la tensión, medida con un voltímetro.

El vatímetro indica la *potencia real*, mientras que el producto $I \cdot V$ indica la potencia llamada *aparente*.

El *factor de potencia* es el cociente de ambas potencias. Se denomina cos φ (coseno de fi), y es adimensional.
Se tiene:

$$\cos \varphi = \text{Potencia real/Potencia aparente}$$

Ejemplo:

Si la potencia útil de una instalación es de $P = 1\,000$ W, y los valores de la intensidad de corriente y de la tensión alternas, obtenidos por medición, son: $I = 20$ A y $V = 110$ V, calcular el valor del factor de potencia.

La potencia aparente será: $P = I \cdot V = 20 \cdot 110 = 2\,200$ W.
De modo que el factor de potencia es:

$$\cos \varphi = 1\,000/2\,200 = 0.455$$

El valor del ángulo φ que entra en el factor de potencia es precisamente el del desfase existente entre la intensidad y la tensión.

10. Potencia de una corriente alterna

Teniendo en cuenta el desfase φ existente entre la intensidad y la tensión de una corriente alterna, se distingue entre:

1. *Potencia real o activa:*

Cuya expresión general es:

$P_{activa} = I \cdot V \cdot \cos \varphi$, y se mide en Watios (W).

2. *Potencia aparente:*

Dada por la fórmula:

$P_{aparente} = I \cdot V$, y se mide en Volt · Amperios (VA).

3. *Potencia reactiva:*

Obtenida del diagrama de la figura 16, al considerar la potencia aparente como la resultante de la potencia real o activa (W) y de otra potencia, llamada reactiva (o, también, *desvatiada*), cuyo valor es:

$P_{reactiva} = I \cdot V \cdot \text{sen } \varphi$, que se mide en Volt · Amperios reactivos (VAr).

Ejemplo:

Conocidos los valores de la intensidad $I = 10$ A y de la tensión $V = 120$ V de una corriente alterna, así como el ángulo de desfase entre ambas $\varphi = 60$ grados, calcular las potencias activa, reactiva y aparente.

De unas tablas de funciones naturales (tabla 6 de la 3.ª parte, pág. 337), se obtiene:

$$\cos \varphi = \cos 60^\circ = 0{,}500$$
$$\text{sen } \varphi = \text{sen } 60^\circ = 0{,}868$$

Por tanto:

$$P_{activa} = 10 \cdot 120 \cdot 0{,}500 = 600 \text{ W}$$
$$P_{reactiva} = 10 \cdot 120 \cdot 0{,}868 = 1042 \text{ VAr}$$
$$P_{aparente} = 10 \cdot 120 = 1200 \text{ VA}$$

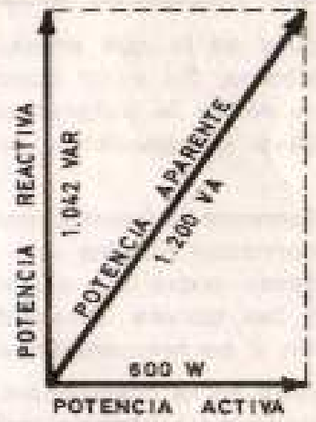


Fig. 16. — La potencia aparente es la resultante de la suma geométrica de la potencia activa y de la potencia reactiva. Por Pitágoras se puede comprobar que: $1200^2 = 600^2 + 1042^2$.

Como comprobación, se ha obtenido gráficamente (a escala) el valor de la potencia aparente a partir de los valores calculados de las potencias activa y reactiva, y del ángulo de desfase φ (fig. 16).

CAPITULO IV

CORRIENTES ALTERNAS POLIFASICAS

1. Introducción

Una corriente alterna, generada tal como hemos visto en el capítulo anterior, constituye una corriente monofásica.

En la práctica, resulta más conveniente utilizar simultáneamente varias corrientes alternas monofásicas que, teniendo idénticos valores eficaces y la misma frecuencia, se encuentren, sin embargo, defasadas entre sí.

El conjunto de varias corrientes monofásicas, que cumplan las condiciones antedichas, constituye un sistema polifásico de corrientes alternas, o, mejor, una corriente alterna polifásica.

También en el transporte y distribución de energía eléctrica es ventajoso el empleo de corrientes polifásicas, pues ello reduce la sección de los cables de transporte.

En este capítulo examinaremos brevemente la corriente bifásica, y más detenidamente la corriente trifásica, ya que son los arrollamientos trifásicos los que constituyen principalmente el tema de este volumen.

2. Grados geométricos y grados eléctricos

Como las máquinas eléctricas rotativas disponen a menudo de más de dos polos, es necesario distinguir entre grados geométricos y grados eléctricos.

Si llamamos p el número de *pares de polos* de la máquina (esto es, número total de polos $= 2p$), la relación entre el número de grados geométricos y de grados eléctricos es:

$$1 \text{ grado geométrico} = p \text{ grados eléctricos}$$

El significado de esta diferencia es el siguiente:

Consideremos (cap. III, § 5) una espira situada en el campo magnético existente entre dos polos. Se tiene que en una vuelta completa de esta espira (o sea, en un giro de 360 grados geométricos) tiene lugar un ciclo completo de variación de la f.e.m. inducida (fig. 17).

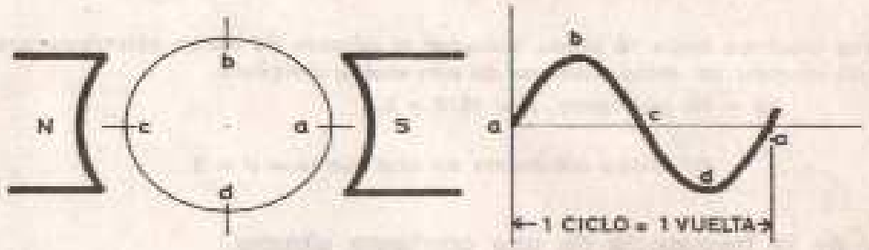


Fig. 17. — En una espira que gira entre dos polos, el ciclo de variación de la fuerza electromotriz inducida tiene lugar en 1 vuelta completa de la espira. En máquinas bipolares, pues, se tiene siempre: grados geométricos = grados eléctricos.

Si, ahora, la espira se sitúa en el campo magnético existente entre cuatro polos (en vez de dos), se comprueba que en una vuelta completa de la espira (o sea, en un giro de 360 grados geométricos) tienen lugar dos ciclos completos de variación de la f.e.m. inducida (fig. 18).

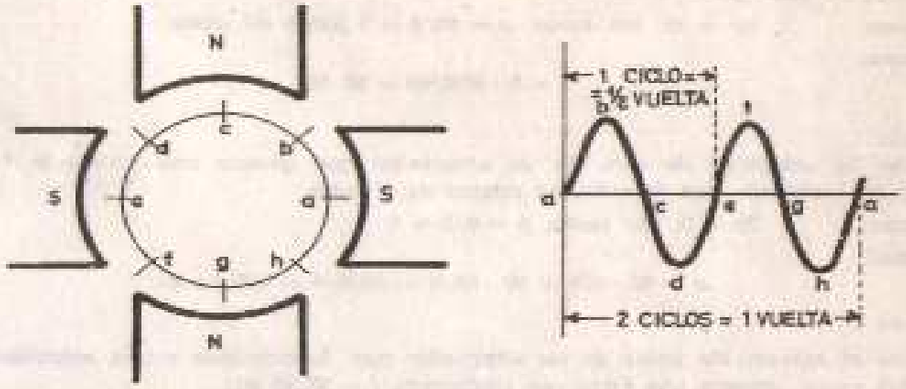


Fig. 18. — En una espira que gira entre cuatro polos, el ciclo de variación de la f.e.m. inducida se alcanza en 1/2 vuelta de la espira. Por ejemplo, el punto a pasa de polo Sur a polo Sur en 1/2 vuelta de la espira; en la figura anterior, en cambio, el punto a pasa de Sur a Sur en 1 vuelta de la espira. En máquinas de más de 2 polos, se ha de distinguir entre grados geométricos y grados eléctricos.

Por tanto, en este último caso, el ciclo eléctrico completo se alcanza al dar media vuelta la espira (esto es, a los 180 grados geométricos). Así, se puede escribir:

$$1 \text{ vuelta de la espira} = p \text{ ciclos eléctricos}$$

fórmula que equivale a la anteriormente expuesta.

Ejemplo:

Una máquina eléctrica tiene 16 polos. Calcular el número de ciclos eléctricos que tienen lugar cuando el rotor de dicha máquina da una vuelta completa.

Se tiene: $2p = 16$, por tanto, $p = 16/2 = 8$

Entonces:

$$\text{N.° ciclos eléctricos en una vuelta} = p = 8$$

3. Valor de la frecuencia de una corriente alterna

De la definición de frecuencia (cap. III, § 4), y de lo anterior, se deduce que si n es el número de revoluciones por minuto (r.p.m.) y p el número de pares de polos, el valor de la frecuencia f de una corriente alterna, mono o polifásica, es:

$$f = p \cdot n/60$$

Ejemplo:

Calcular la frecuencia de la f.e.m. generada en un alternador de 10 polos que gira a una velocidad de 600 r.p.m.

Se tiene: $2p = 10$, por tanto, $p = 10/2 = 5$ pares de polos

Entonces:

$$f = 5 \cdot 600/60 = 50 \text{ Hz}$$

Ejemplo:

Calcular la velocidad de giro de un alternador que genera una f.e.m. de frecuencia $f = 60$ Hz, sabiendo que la máquina consta de 8 polos.

Se tiene: $2p = 8$, por tanto, $p = 8/2 = 4$

Entonces:

$$n = 60 \cdot f/p = 60 \cdot 60/4 = 3600/4 = 900 \text{ r.p.m.}$$

Ejemplo:

Calcular el número de polos de un alternador que, funcionando a una velocidad de giro de 2000 r.p.m., genera una f.e.m. de frecuencia $f = 33{,}33$ Hz.

Se tiene:

$$p = 60 \cdot f/n = 60 \cdot 33{,}33/2000 = 2000/2000 = 1$$

Así, el número total de polos es:

$$2p = 2 \cdot 1 = 2$$

Ejemplo:

¿Es posible construir un alternador que, girando a 1000 r.p.m., genere una f.e.m. de frecuencia $f = 25$ Hz?

Haría falta una máquina de:

$$p = 60 \cdot f/n = 60 \cdot 25/1000 = 1500/1000 = 1{,}5 \text{ pares de polos.}$$

O sea, que no es posible, ya que solamente se pueden construir máquinas con un número entero de pares de polos.

A continuación se da una tabla donde, para frecuencias de 50 y 60 Hz, se expresan las velocidades de giro correspondientes a máquinas sincrónicas con diferente número de polos:

Tabla 3: Número de revoluciones por minuto de máquinas sincrónicas

N.° de polos $2p =$	N.° de r.p.m. a la frecuencia: $f = 50$ Hz	$f = 60$ Hz
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600
14	428	514
16	375	450
18	333,3	400
20	300	360
22	272,7	327,2
24	250	300

4. Corriente alterna bifásica

Es el conjunto de dos corrientes alternas monofásicas que se encuentran defasadas entre sí 90 grados eléctricos, pero que ambas tienen la misma frecuencia e idéntico valor eficaz.

La generación más sencilla de una corriente bifásica se obtiene, de modo análogo al explicado para una corriente monofásica, situando dos espiras desplazadas 90 grados eléctricos entre sí, en el seno de un campo magnético formado por un par de polos (fig. 19 *a* y *b*).

En la fase 1 se engendra una f.e.m. E_1 alterna, y en la fase 2, idéntica a la 1 pero retrasada 90 grados eléctricos, se generará una f.e.m. E_2 de la

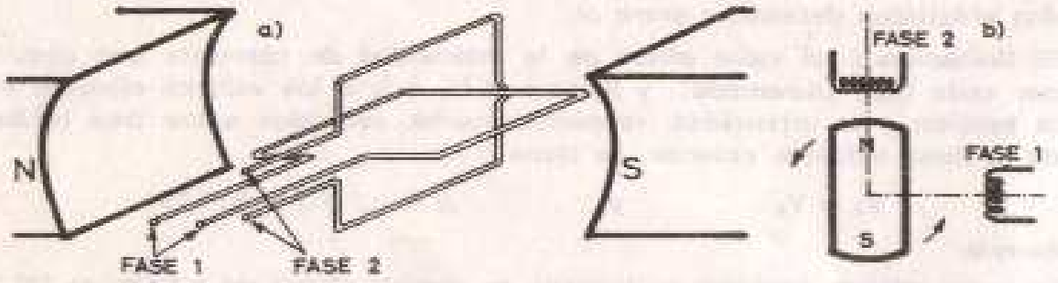


Fig. 19.— Generación de corriente bifásica. a) Situación espacial de las espiras (fases). b) Esquema simplificado: aquí las espiras son fijas y los polos giran.

misma frecuencia f y valor eficaz que E_1, pero con un desfase de 90 grados eléctricos.

5. Corriente alterna trifásica

Es el conjunto de tres corrientes alternas monofásicas que, teniendo la misma frecuencia e idéntico valor eficaz, cada una de ellas se encuentra defasada 120 grados eléctricos respecto a la que le precede y a la que le sigue.

Se generan corrientes trifásicas situando, en el inducido de una máquina eléctrica rotativa, tres espiras (devanados) idénticas, pero desplazadas entre sí 120 grados eléctricos (fig. 20).

Recordemos aquí que el desplazamiento debe medirse en grados eléctricos, y no en grados geométricos; solamente en máquinas bipolares ($p = 1$) coinciden ambos conceptos.

En las condiciones expresadas, en la fase (devanado) 1 se genera una f.e.m. E_1 alterna, representada de trazo grueso en la figura 21. En la fase (devanado) 2, idéntica a la 1 pero 120 grados eléctricos defasada, se engendra una f.e.m. E_2 alterna, representada de trazo fino en la figura 21. Y, finalmente, en la fase (devanado) 3, idéntica a las 1 y 2 pero defasada 120 grados eléctricos respecto a ambas (en atraso y adelanto, respectivamente), se genera una f.e.m. E_3 alterna, representada de trazos en la figura 21.

Las f.e.ms. E_1, E_2 y E_3 tienen la misma frecuencia f, ya que ésta es sólo función del número p de pares de polos y del número n de r.p.m. del rotor ($f = p \cdot n/60$). Por otra parte, E_1, E_2 y E_3 tienen el mismo valor eficaz, ya

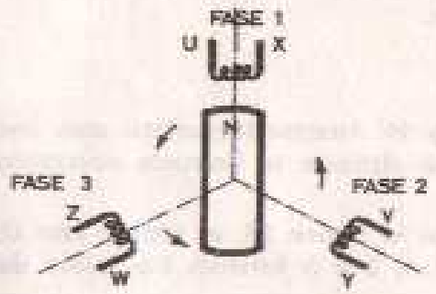


Fig. 20.— Generación de una corriente (o tensión) trifásica.

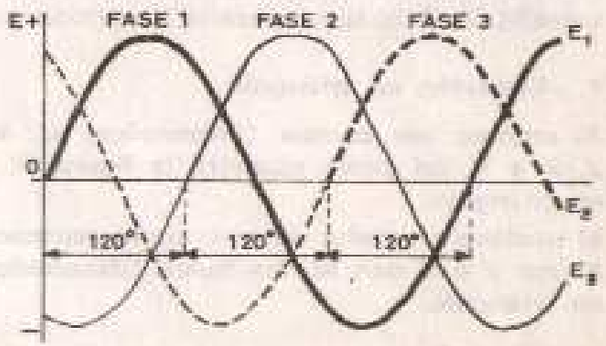


Fig. 21.— Representación de las f.e.ms. generadas en las fases. Desfase entre curvas = 120°.

que las espiras (devanados) 1, 2 y 3 son idénticas entre sí. Sin embargo, por el desfase de los devanados, las f.e.ms. se encuentran también 120 grados eléctricos defasadas entre sí.

6. Terminales, conexiones

Los extremos de cada una de las tres espiras (devanados) independientes del arrollamiento de una máquina eléctrica trifásica, se llaman terminales, y para diferenciarlos entre sí se denomina:

— U : al principio de la espira (devanado) 1
— V : al principio de la espira (devanado) 2
— W : al principio de la espira (devanado) 3
— X : al final de la espira (devanado) 1
— Y : al final de la espira (devanado) 2
— Z : al final de la espira (devanado) 3

Esta notación es la aceptada y empleada internacionalmente.

Los seis terminales (U, V, W y X, Y, Z) que tiene siempre un arrollamiento trifásico, se pueden sacar del inducido de la máquina y (los del estator) se llevan entonces a la caja de bornes.

Los seis bornes de la caja de bornes reciben el mismo nombre del terminal que le ha sido conectado, tal como indican las figuras 22 y 24.

Entre dichos bornes (y, por tanto, entre los terminales) se pueden establecer dos conexiones esenciales: conexión en triángulo y conexión en estrella. Ambas las veremos a continuación.

7. Conexión en triángulo

Si unimos los bornes (terminales) *U*, *V* y *W* respectivamente con los *Z*, *X* e *Y*, tal como muestra la figura 22, se obtiene la llamada conexión en triángulo.

El nombre proviene de que, como representa la figura 23, al unir *Z* con *U*, *X* con *V* e *Y* con *W*, las fases (devanados) 1, 2 y 3 forman los lados de un triángulo.

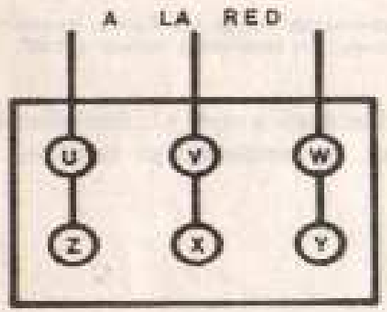


Fig. 22. — Conexión en triángulo, verificada puenteando correctamente los bornes de la caja de bornes.

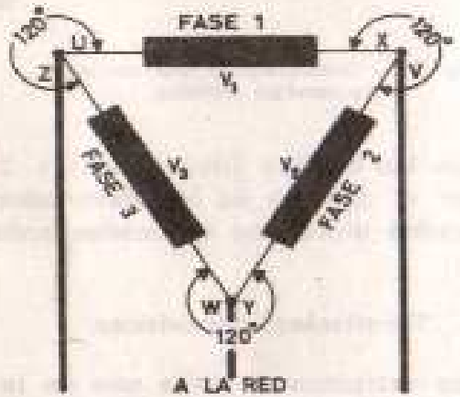


Fig. 23. — Esquema que muestra gráficamente la situación eléctrica de las fases tras la conexión en triángulo.

En el caso de tratarse de un generador trifásico, conectado en triángulo, de los terminales unidos (*Z-U*), (*X-V*) e (*Y-W*) parten tres cables que constituyen la salida de las 3 fases de la línea de corriente alterna generada.

En el caso de tratarse de un motor trifásico, conectado en triángulo, a los terminales unidos (*Z-U*), (*X-V*) e (*Y-W*) llegan los tres cables que constituyen la entrada de las tres fases de la línea de la red alterna trifásica.

En cualquier caso, entre los terminales *U* y *V* existe, como se desprende de la figura 23, la tensión V_1 correspondiente a la f.e.m. E_1 generada en la fase (devanado) 1. Análogamente, entre los terminales *V* y *W* existe la tensión V_2, y entre los terminales *W* y *U* la tensión V_3.

Las tensiones V_1, V_2 y V_3 tienen el mismo valor eficaz V_F, y están 120 grados eléctricos defasadas entre sí.

Si llamamos I_F al valor eficaz de la intensidad de corriente que circula por cada fase (devanado), y llamamos V_R e I_R a los valores eficaces de la tensión y la intensidad, respectivamente, referidos a los tres cables de la línea trifásica exterior, se tiene:

$$V_F = V_R \qquad \text{y} \qquad I_F = I_R/\sqrt{3} = I_R/1{,}73$$

Ejemplo:

Un motor trifásico, conectado en triángulo, se intercala en una red trifásica de 220 V. ¿Cuál es la tensión en cada uno de los devanados del arrollamiento del motor?

Se tiene que: $V_R = 220$ V. Así, pues:

$$V_F = V_R = 220 \text{ V}$$

Ejemplo:

Al conectar a la red el motor del ejemplo anterior, circula una intensidad de $I_F = 6$ A por cada devanado del motor. Calcular la intensidad de corriente que circula por la línea de la red trifásica.

Se tiene:

$$I_R = \sqrt{3} \cdot I_F = 1{,}73 \cdot 6 = 10{,}38 \text{ A}$$

8. Conexión en estrella

Si unimos entre sí los bornes (terminales) *X*, *Y* y *Z*, tal como indica la figura 24, se obtiene la llamada conexión en estrella.

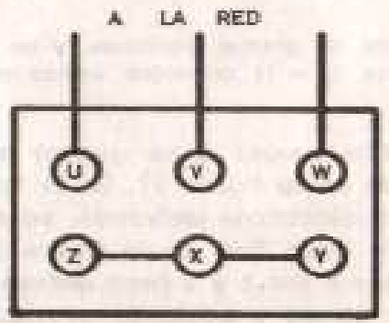


Fig. 24. — Conexión en estrella (caja de bornes).

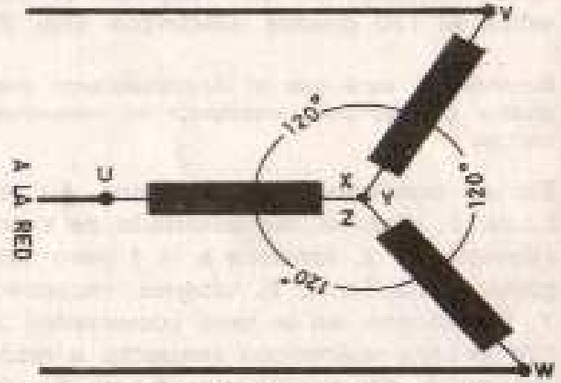


Fig. 25. — Situación de las fases tras la conexión en estrella.

El nombre proviene de que, como representa la figura 25, las fases (devanados) 1, 2 y 3, al verificar esta conexión, quedan formando una estrella.

Con la notación utilizada en el epígrafe anterior, se tiene ahora que:

$$V_r = V_s/\sqrt{3} = V_s/1{,}73 \qquad \text{e} \qquad I_r = I_s$$

Ejemplo:

Un motor trifásico, conectado en estrella, se intercala en una red trifásica de 220 V. ¿Cuál es la tensión en cada uno de los devanados del motor?

Se tiene:

$$V_r = V_s/\sqrt{3} = 220/1{,}73 = 127 \text{ V}$$

Ejemplo:

Al conectar a la red el motor del ejemplo anterior, circula una intensidad de $I_r = 10{,}38$ A por cada devanado del mismo. Calcular la intensidad de corriente que circula por la línea de la red trifásica.

Se tiene:

$$I_s = I_r = 10{,}38 \text{ A}$$

Conviene comparar estos dos ejemplos con los dos análogos correspondientes al caso de conexión en triángulo.

9. Conexión en estrella, con hilo neutro

El montaje en estrella presenta la posibilidad de sacar un cuarto cable (figura 26) del punto común de conexión de los terminales *X*, *Y* y *Z*.

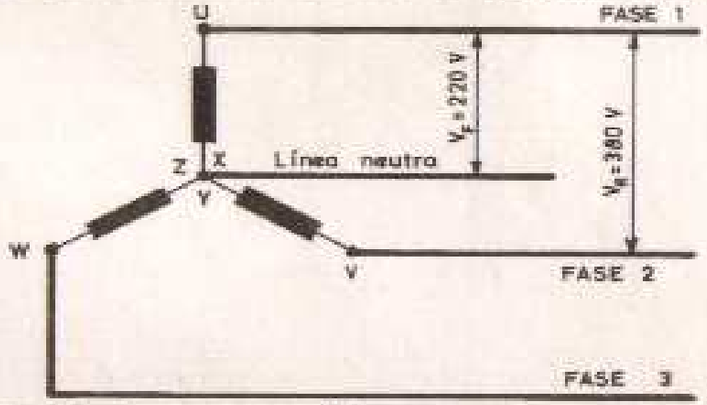


Fig. 26. — Del punto neutro XYZ de la conexión en estrella, se puede sacar una cuarto línea.

Dicho cuarto cable se llama hilo neutro, mientras que el punto de conexión de *X*, *Y* y *Z*, se llama punto neutro.

La ventaja de disponer de una línea trifásica con hilo neutro consiste en que se pueden tomar, de dicha línea, dos tensiones diferentes:

— La tensión V_r, existente entre el hilo neutro y uno cualquiera de los otros cables de la red, y

— La tensión V_s, que existe entre dos cables cualquiera diferentes del hilo neutro.

10. Potencia activa (o real) de un sistema trifásico

Con la notación hasta ahora empleada, la potencia activa de un sistema trifásico se puede obtener por la fórmula:

$$P_{activa} = 3 \cdot I_r \cdot V_r \cdot \cos \varphi$$

Si, en vez de los valores I_r y V_r, se conocen los de la intensidad I_s y la tensión V_s de la línea de la red trifásica, la potencia activa se puede determinar mediante la fórmula:

$$P_{activa} = \sqrt{3} \cdot I_s \cdot V_s \cdot \cos \varphi$$

Las dos fórmulas anteriores son equivalentes y válidas, tanto en el caso de conexión en triángulo como si la conexión es en estrella.

Ejemplo:

Admitiendo que se trabaja con un factor de potencia $\cos \varphi = 0{,}85$, calcular la potencia activa de un motor, conectado en triángulo, que estando intercalado en una línea trifásica de 220 V es recorrido por una corriente de $I = 6$ A.

Así, los datos de partida son: $I_s = 6$ A, $V_s = 220$ V y $\cos \varphi = 0{,}85$.

Calculemos previamente los valores de I_r y de V_r. Se tiene:

$$I_r = \sqrt{3} \cdot I_s = 1{,}73 \cdot 6 = 10{,}38 \text{ A}$$

$$V_r = V_s = 220 \text{ V}$$

Por tanto, la potencia activa será:

$$P_{activa} = 3 \cdot I_r \cdot V_r \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 6 \cdot 220 \cdot 0{,}85 = 3{,}36 \text{ kW}$$

Comprobemos que con la segunda fórmula obtenemos idéntico valor:

$$P_{activa} = \sqrt{3} \cdot I_s \cdot V_s \cdot \cos \varphi = 1{,}73 \cdot 10{,}38 \cdot 220 \cdot 0{,}85 = 3{,}36 \text{ kW}$$

Ejemplo:

Admitiendo que se trabaja con un factor de potencia cos $\varphi = 0{,}70$, calcular la potencia activa de un motor, conectado en estrella, que estando intercalado en una red de 660 V es recorrido por una corriente de $I = 5$ A.

Los datos de partida son, pues: $I_s = 5$ A, $V_s = 660$ V y cos $\varphi = 0{,}70$.

Calculemos previamente los valores de I_r y de V_r. Se tiene:

$$I_s = I_r = 5 \text{ A}$$

$$V_r = V_s/\sqrt{3} = 660/1{,}73 = 380 \text{ V}$$

Por tanto, la potencia activa será:

$$P_{activa} = 3 \cdot I_r \cdot V_r \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 5 \cdot 380 \cdot 0{,}70 = 3{,}99 \text{ kW}$$

Comprobemos que con la segunda fórmula obtenemos idéntico valor:

$$P_{activa} = \sqrt{3} \cdot I_s \cdot V_s \cdot \cos \varphi = 1{,}73 \cdot 5 \cdot 660 \cdot 0{,}70 = 3{,}99 \text{ kW}$$

11. Potencias aparente y reactiva

Del mismo modo como ya vimos para corrientes alternas monofásicas (capítulo III, § 10), las potencias aparente y reactiva vienen dadas por las siguientes fórmulas:

$$P_{aparente} = 3 \cdot I_r \cdot V_r$$

que se mide en Volt·Amperios (VA)

$$P_{reactiva} = 3 \cdot I_r \cdot V_r \cdot \text{sen } \varphi$$

que se mide en Volt·Amperios reactivos (VAr).

Las fórmulas anteriores, expresadas en función de los valores de la intensidad I_s y la tensión V_s en la línea, toman la forma:

$$P_{aparente} = \sqrt{3} \cdot I_s \cdot V_s$$

medida en VA, y

$$P_{reactiva} = \sqrt{3} \cdot I_s \cdot V_s \cdot \text{sen } \varphi$$

medida en VAr.

Como sucede con las dos expresiones de la potencia activa (§ 10), el par de fórmulas que dan las potencias aparente y reactiva son respectivamente equivalentes y válidas tanto en la conexión en triángulo como en estrella.

CAPITULO V

MAQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS PARA CORRIENTES TRIFASICAS

1. Introducción

Antes de entrar en el estudio de los arrollamientos prácticos para corrientes trifásicas, conviene indicar en qué máquinas eléctricas rotativas aparecen dichos arrollamientos.

En este capítulo estudiaremos, de modo elemental, la constitución de los dos tipos de máquinas eléctricas más importantes entre aquéllas que disponen de arrollamientos trifásicos, es decir, de los:

— Alternadores, y
— Motores asincrónicos.

Aunque en otras máquinas eléctricas rotativas de considerables aplicaciones aparecen también arrollamientos trifásicos, como, por ejemplo: en los motores sincrónicos, motores trifásicos con colector, generadores asincrónicos, etc., los motores asincrónicos son los que más a menudo se presentan ante el bobinador.

2. Alternadores

Los alternadores son máquinas eléctricas rotativas que, mediante la aplicación de una energía mecánica que proporciona una velocidad n de giro a su parte móvil, generan una corriente alterna.

La característica particular de un alternador es que, cualquiera que sea la potencia eléctrica que desarrolle, entre el número n de r.p.m. del rotor, el número p de pares de polos, y la frecuencia f de la tensión alterna generada, existe siempre la relación:

$$n = 60 \cdot f/p$$

Por este hecho, se dice que los alternadores son máquinas sincrónicas.

3. Alternadores trifásicos

Son generadores sincrónicos de corriente alterna trifásica.

Como toda máquina eléctrica rotativa, constan de una parte fija, el estator, y de otra parte, móvil, el rotor.

Mecánicamente, el estator está constituido por un paquete de chapas magnéticas ranuradas (fig. 27). En dichas ranuras, y con arreglo a un determinado esquema, se insertan los tres devanados independientes que constituyen el arrollamiento trifásico.

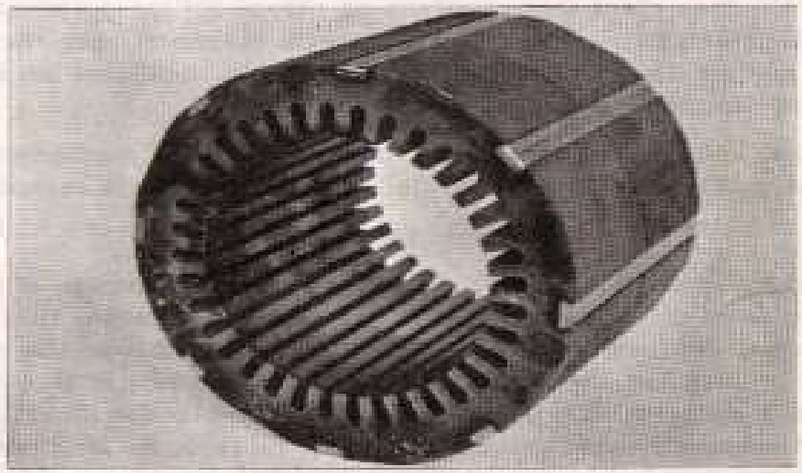


Fig. 27. — Paquete de chapas del estator, sin carcasa. (Cortesía de Siemens-Schuckert, Erlangen.)

El estator se encuentra rígidamente sujeto a la carcasa del alternador. Los seis terminales del arrollamiento trifásico se pueden llevar a la caja de bornes solidaria a la carcasa de la máquina.

El rotor de los alternadores está también constituido por chapas magnéticas semejantes a las del estator. Ahora bien, dichas chapas pueden estar ranuradas o pueden formar unos cuerpos polares. En el primer caso se dice que el rotor es de:

— *entrehierro constante*;

en el segundo caso el rotor se llama de:

— *polos salientes*.

En ambos casos, en el rotor se colocan, insertadas en las ranuras (caso de rotor de entrehierro constante), o arrolladas alrededor de los polos (caso de rotor de polos salientes), bobinas que son recorridas por corriente continua.

Así pues, solamente en el estator es donde aparece un arrollamiento trifásico. En el rotor se dispone un simple arrollamiento de corriente continua.

4. Motores asincrónicos

Son las máquinas eléctricas rotativas de mayor aplicación práctica. Como todo motor eléctrico, transforman la energía eléctrica (que reciben de la red a la que se conectan) en energía mecánica, mediante un giro de su parte móvil, capaz de desarrollar un trabajo.

Al contrario que los alternadores, no son máquinas sincrónicas. Quiere esto decir que su número de revoluciones no guarda la relación exacta:

$$n = 60 \cdot f/p$$

Aunque el valor de la frecuencia f se mantenga constante, el número n' de revoluciones de un motor asincrónico no es constante, sino que varía con la carga, esto es, varía según la potencia mecánica que desarrolla. El número n' de r.p.m. de un motor asincrónico es siempre algo menor que el número n de r.p.m. que se obtiene de la fórmula $n = 60 \cdot f/p$. En cada caso la divergencia viene condicionada por el valor de un factor llamado deslizamiento, factor que estudiaremos seguidamente.

5. Deslizamiento

La velocidad de giro dada por la fórmula $n = 60 \cdot f/p$ se llama velocidad sincrónica. Como hemos dicho, los motores asincrónicos funcionan siempre (incluso sin exigirles potencia) a una velocidad n' de giro algo menor que la sincrónica.

Se llama deslizamiento de un motor asincrónico a la relación:

$$\text{deslizamiento} = \frac{n - n'}{n}$$

Ejemplo

Un motor asincrónico de 4 polos gira a una velocidad de 1400 r.p.m. al ser conectado a una red de 50 Hz. Calcular el deslizamiento en estas condiciones.

La velocidad sincrónica es:

$$n = 60 \cdot f/p = 60 \cdot 50/2 = 1500 \text{ r.p.m.}$$

Así, pues, el deslizamiento vale:

$$\text{deslizamiento} = \frac{n - n'}{n} = \frac{1500 - 1400}{1500} = 100/1500 = 0{,}066$$

Conocido el deslizamiento que, en condiciones determinadas, tiene un motor asincrónico, se puede calcular su velocidad de giro mediante:

$$n' = n \ (1 - \text{deslizamiento})$$

Ejemplo:

Un motor asincrónico de 4 polos, conectado a una red de 60 Hz, presenta a determinada potencia un deslizamiento igual a 0,05. Calcular la velocidad de giro del motor cuando desarrolla dicha potencia.

La velocidad sincrónica es:

$$n = 60 \cdot f/p = 60 \cdot 60/2 = 1800 \text{ r.p.m.}$$

Así, pues, la velocidad de giro del motor vale:

$$n' = n \ (1 - \text{deslizam.}) = 1800 \ (1 - 0{,}05) = 1800 \cdot 0{,}95 = 1710 \text{ r.p.m.}$$

El deslizamiento, repetimos, varía con la potencia que desarrolla el motor. Cuanto mayor es dicha potencia, más deslizamiento tiene el motor y, en consecuencia, tanto menor es su velocidad de giro n'.

6. Motores asincrónicos trifásicos

Son motores asincrónicos diseñados para ser conectados a una red trifásica.

Su estator está constituido por un paquete de chapas magnéticas ranuradas, y en las ranuras del mismo se alojan, con arreglo a un determinado esquema, los tres devanados independientes de un arrollamiento trifásico. Los terminales de este arrollamiento, que puede estar conectado en triángulo o en estrella, se llevan a los bornes de la caja de bornes, en donde se conectan a la red trifásica de alimentación.

Según sea el circuito eléctrico dispuesto en el rotor, se distingue entre motores asincrónicos de:

— *Rotor en jaula de ardilla.*

En cuyo caso, en las ranuras del rotor (y ajustándose a la forma de las mismas) van insertadas unas barras de material conductor (en general, cobre, aluminio o latón) cuyos extremos van soldados a dos

anillos (del mismo material que compone las barras) que se llaman anillos de cortocircuito.

Este circuito eléctrico especial, que es también trifásico aunque resulta más complicado de ver, es el más utilizado en los motores asincrónicos, debido a su robustez y fácil construcción.

Cuando el material utilizado como conductor es el aluminio, el circuito eléctrico se obtiene por inyección de aluminio fundido (fig. 28).

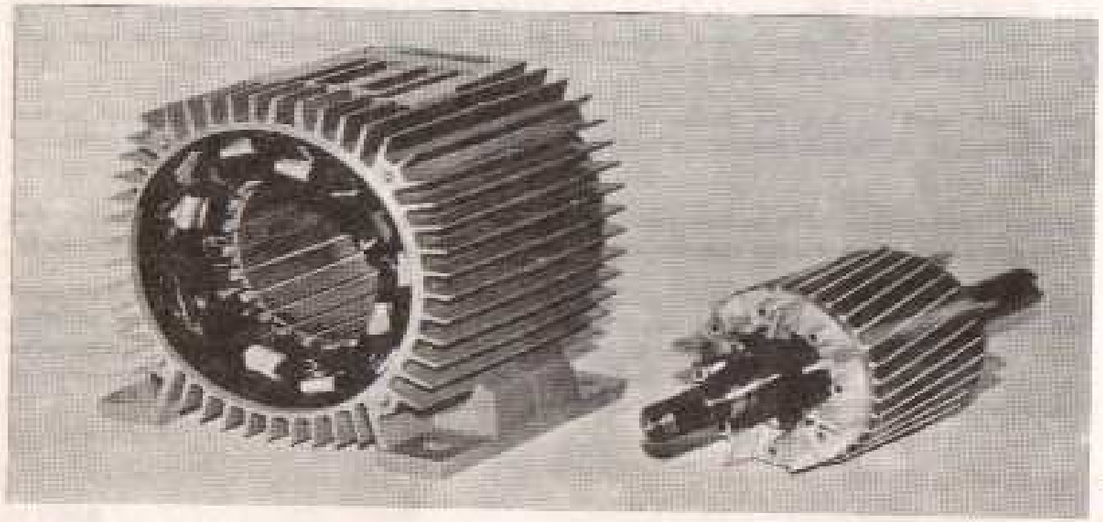


Fig. 28. — Rotor en jaula de ardilla, de aluminio inyectado. A la izquierda, la correspondiente carcasa y estator con su arrollamiento. (Cortesía de Asea/Suecia.)

— *Rotor de anillos rozantes:*

Fig. 29. — Rotor, bobinado, de anillos rozantes. (Cortesía de Siemens-Schuckert, Erlangen.)

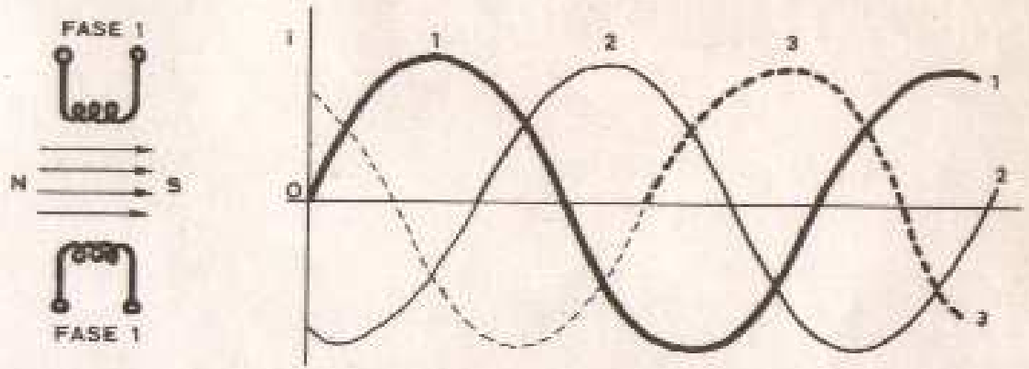
En este caso (fig. 29), en las ranuras del rotor se aloja un arrollamiento, generalmente trifásico, conectado en estrella o triángulo, cuyos tres terminales restantes descansan, cada uno, sobre un anillo por medio de correspondientes escobillas.

Durante su puesta en marcha y funcionamiento, el motor asincrónico de rotor de anillos rozantes lleva cortocircuitados los terminales que descansan sobre los anillos.

7. Campo magnético giratorio

Cuando un devanado monofásico fijo es recorrido por una corriente alterna, se genera un campo magnético alterno cuya intensidad varía del mismo modo que la corriente, pero cuya orientación norte-sur es siempre la misma (fig. 30).

Por el contrario, cuando el arrollamiento trifásico del estator de un motor es conectado a una red de corriente trifásica, se genera un campo magnético que no solamente es alterno sino que, además, es giratorio; esto es, la orientación norte-sur va girando constantemente.



Figs. 30 y 31. — El campo magnético generado en un devanado monofásico fijo es alterno, pero su orientación N-S es siempre fija (ver fig. izqda.). — En alterna trifásica, la corriente en la fase 2 no crece hasta que disminuye la de la fase 1; asimismo, la corriente en la fase 3 no crece hasta que la de la fase 2 disminuye.

Este campo magnético giratorio se forma en cada instante por la combinación de cada uno de los campos magnéticos que genera cada devanado monofásico.

Como (fig. 31) la corriente de la fase 2 no crece hasta que disminuye la corriente de la fase 1, el campo generado por el devanado 1 prevalece primero (fig. 32 *a*); pero, al crecer la corriente de la fase 2, la orientación dominante del campo magnético pasa a ser la de la figura 32 *b*. Después, decrece la corriente del devanado de la fase 2 y aumenta la de la fase 3, de modo que la orientación del campo magnético resultante es la de la figura 32 *c*. Y cuando la corriente del devanado de la fase 3 decrece, aumenta la de la fase 1, con lo cual volvemos al estado de la figura 32 *a*, repitiéndose el fenómeno sucesivamente. El resultado es que la orientación norte-sur del campo magnético gira constantemente; este campo giratorio es el que arrastra al rotor en los motores asincrónicos.

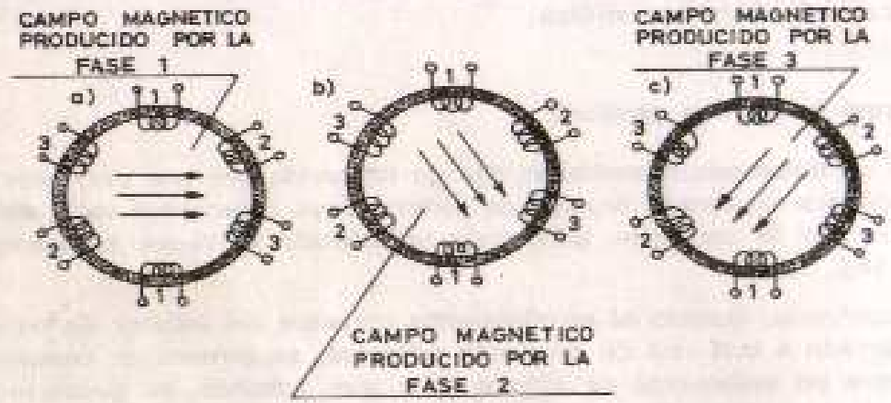


Fig. 32. — Campo magnético giratorio engendrado por la corriente alterna que circula por un arrollamiento trifásico. La orientación N-S gira.

8. Comparación de los arrollamientos trifásicos mencionados

Los arrollamientos trifásicos de los estatores de alternadores y de motores asincrónicos, así como los arrollamientos trifásicos de los rotores de anillos rozantes, son fundamentalmente semejantes entre sí.

Así, pues, todo lo que en capítulos posteriores se exprese, de modo general, sobre arrollamientos trifásicos, puede ser referido a cualquiera de los arrollamientos trifásicos citados.

Existen, ciertamente, diferencias particulares en determinados puntos del cálculo. Sin embargo, estas divergencias quedan, en general, fuera del dominio del taller de bobinado.

También entre los arrollamientos trifásicos utilizados en las grandes máquinas eléctricas rotativas y los correspondientes en máquinas de potencias mesuradas existen diferencias, hasta de ejecución. Pero, en lo que sigue, prescindiremos de tales divergencias ya que solamente atenderemos a los arrollamientos trifásicos de las máquinas eléctricas rotativas de mediana y pequeña potencia (las más frecuentes).

CAPITULO VI

COMPONENTES DE UN ARROLLAMIENTO. DATOS PARA SU EJECUCION

1. Introducción

Todo arrollamiento está formado por el conjunto ordenado de varios elementos menos complejos que, a su vez, están compuestos por otras partes cada vez más simples, llegando por último al conductor elemental que, en la mayoría de los casos, es de cobre con una fina película de esmalte aislante.

En este capítulo estudiaremos, primeramente, cada uno de los citados elementos, por separado, partiendo del más sencillo de ellos hasta llegar al conjunto final, o sea, al arrollamiento. De este modo será fácil distinguir y reconocer tales elementos en los capítulos posteriores, allí donde se presenten formando parte del arrollamiento.

Asimismo, expondremos en este capítulo los datos que son necesarios para que el operario bobinador comience a ejecutar un arrollamiento, para que, así, se tenga una idea clara del punto de partida.

2. Bobina simple, lados de bobina, cabezas de bobina

En la práctica, el elemento más sencillo de un arrollamiento es la bobina simple.

Una bobina simple está constituida por un hilo conductor, provisto de un aislamiento superficial, que es arrollado sobre sí mismo un número previsto de veces (vueltas).

Es característico de una bobina simple que el conductor que la forma es continuo, esto es, solamente tiene un principio *P* y un final *F*, sin ningún añadido o conexión intermedia (fig. 33).

En una bobina simple distinguiremos entre:

— *Lados de la bobina:*

Concepto que se desprende de la figura 33. Existen, pues, dos lados en cada bobina simple. Ambos lados tienen el mismo número de conductores, número que coincide con el de vueltas arrolladas.

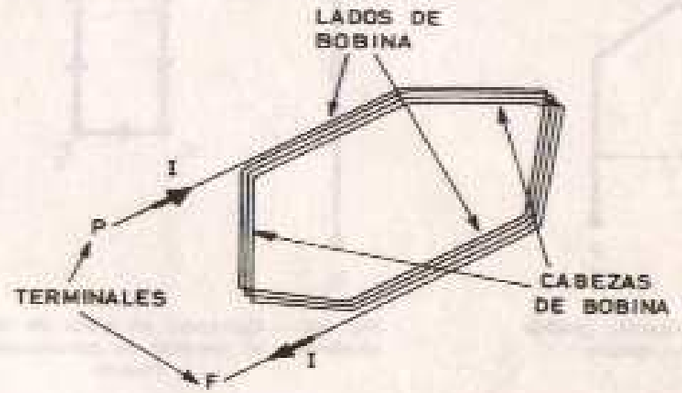


Fig. 33. — Bobina simple: concepto de lados y cabezas de bobina.

En los lados de las bobinas es donde se generan las tensiones eléctricas. Es muy importante observar que, si la corriente *I* entra en la bobina por el principio *P* de la misma (fig. 33), todos los conductores del lado *P* son atravesados por una corriente *I* cuyo sentido es opuesto al de la corriente *I* que atraviesa los conductores del lado *F*.

Insistiremos sobre este punto más adelante.

— *Cabezas de la bobina:*

Concepto que se desprende de la figura 33. Existen, pues, dos cabezas en cada bobina simple.

En las cabezas de las bobinas no se generan tensiones eléctricas. La misión de las cabezas de bobina es, exclusivamente, unir los lados de la bobina, con lo que, así, se suman las tensiones generadas en dichos lados.

3. Representación de la bobina simple. Conexiones entre bobinas simples

Cualquiera que sea el número de vueltas de una bobina simple, la representaremos, por simplificación, como si estuviese formada por un conductor único (fig. 34).

Al igual que cualquier conductor eléctrico, dos o más bobinas simples se pueden conectar entre sí, ya sea en serie (fig. 35) o en paralelo (fig. 36). Como se observa en la figura 35, al unir en serie dos bobinas simples, se conecta el final F_1 de una de ellas con el principio P_2 de la siguiente.

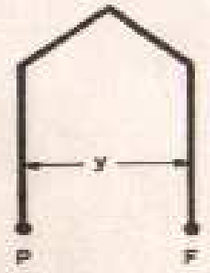


Fig. 34. — Representación gráfica de una bobina simple.

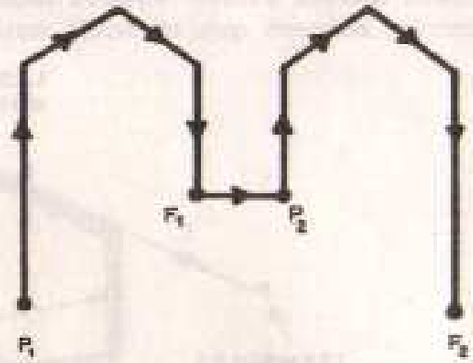


Fig. 35. — Conexión en serie de dos bobinas; obsérvese el sentido de circulación de la corriente.

Y para conectarlas en paralelo, por el contrario, hay que unir entre sí los principios P_1 y P_2, y, por otra parte, los finales F_1 y F_2 (fig. 36).

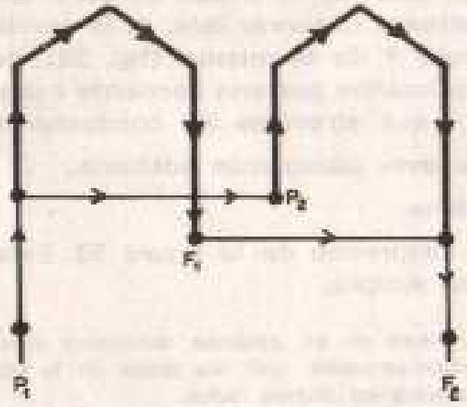


Fig. 36. — Conexión en paralelo de dos bobinas; obsérvese el sentido de circulación de la corriente.

Si varias bobinas simples forman parte de un mismo devanado, no existe, en principio, ningún inconveniente de unirlas en serie. Por el contrario, para unir en paralelo dos o más bobinas simples pertenecientes a un mismo devanado, es necesario que las bobinas sean idénticas entre sí, y que se genere en cada una de ellas exactamente la misma tensión, en magnitud y en fase (ver capítulo XI).

4. El grupo de bobinas como conjunto de bobinas simples

Un grupo de bobinas consta de dos o más bobinas simples que no están conectadas entre sí, sino que desde su principio *P* hasta su final *F* el hilo conductor es continuo (fig. 37 *a* y *b*).

En el taller de bobinado, un grupo de bobinas se obtiene como sigue: Al concluir de arrollar sobre el molde el número de vueltas del conductor que forma la primera bobina simple del grupo, se pasa el hilo al molde contiguo y, sin interrupción, comienza a arrollarse la segunda bobina simple del grupo; y después la tercera, cuarta, etc., si las hay.

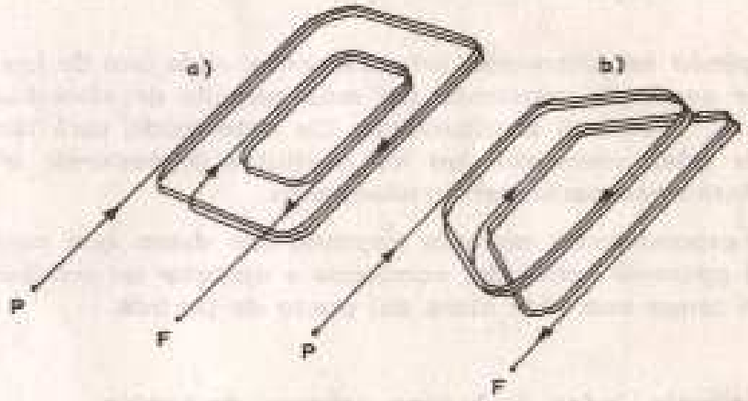


Fig. 37. — El grupo de bobinas no tiene ninguna conexión intermedia. a) Grupo de bobinas de distinto ancho. b) Grupo de bobinas del mismo ancho.

Un grupo de bobinas se caracteriza porque, como la bobina simple, solamente consta de un principio *P* y de un final *F*, cualquiera que sea el número de bobinas que formen el grupo. Generalmente, todas las bobinas de un grupo tienen el mismo número de vueltas (conductores); sin embargo, en algunos casos no es así (ver arrollamientos mixtos, cap. VII, § 8).

Como fácilmente puede razonarse (fig. 37 *a* y *b*), unos lados de bobinas del grupo están recorridos por una corriente *I* de cierto sentido, mientras que los lados restantes están recorridos por la misma corriente *I*, pero de sentido opuesto al anterior.

Las bobinas que componen un grupo, o bien son todas del mismo paso (bobinas iguales, fig. 37 *b*), o bien son de paso variable, en cuyo caso se habla de bobinas concéntricas (fig. 37 *a*).

5. Representación del grupo de bobinas. Conexiones entre grupos

Análogamente al caso de la bobina simple, representaremos el grupo de bobinas, en primera simplificación, como si cada bobina del grupo estuviese formada por un solo conductor.

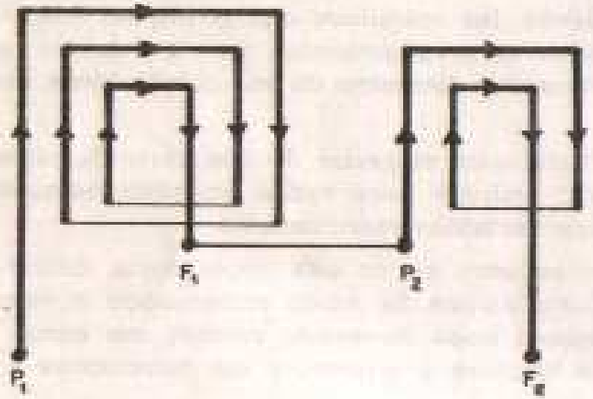


Fig. 38. — Conexión en serie de dos grupos de bobinas; obsérvese el sentido de circulación de la corriente.

También los grupos de bobinas de un mismo devanado pueden ser conectados en serie (fig. 38) o en paralelo (fig. 39). Y, de modo análogo al de la bobina simple, mientras que eléctricamente no existe ningún inconveniente para unir en serie grupos de bobinas de un mismo devanado, por el contrario, solamente se pueden unir en paralelo grupos de bobinas cuando dichos grupos son idénticos entre sí y la tensión resultante en ellos tiene exactamente la misma magnitud y fase.

El estudio detenido de la conexión en paralelo de grupos de bobinas se verá en el capítulo XI.

6. El devanado monofásico como conjunto de grupos de bobinas

En general, cada devanado monofásico está constituido por un conjunto de grupos de bobinas que se hallan eléctricamente conectados entre sí, de acuerdo con un plan o esquema de conexión. Salvo en casos particulares, en los que todos los grupos de bobinas de una fase se devanan sin interrupción, normalmente los diversos grupos de bobinas son independientes entre sí hasta el momento en que se realiza su conexión.

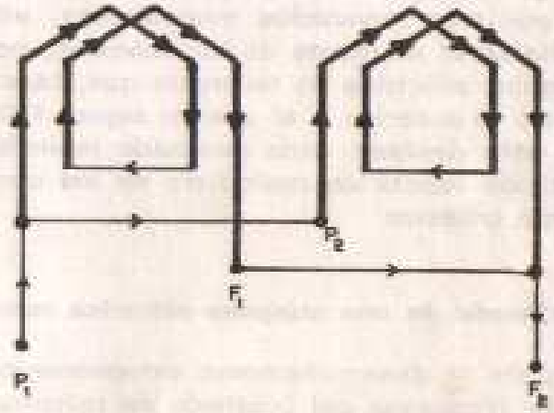


Fig. 39. — Conexión en paralelo de dos grupos de bobinas iguales; obsérvese el sentido de circulación de la corriente.

Un devanado monofásico puede estar constituido por varios grupos de bobinas que tengan cada uno diferente número de bobinas; por ejemplo (figura 40), por un grupo de 3 bobinas y dos grupos de 2 bobinas, unidos todos en serie.

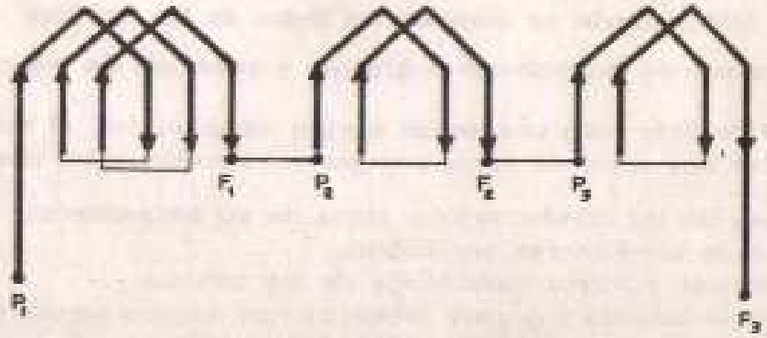


Fig. 40. — Devanado monofásico con un grupo de 3 bobinas y dos grupos de 2 bobinas.

La conexión de los diversos grupos de bobinas, para formar el devanado parcial, se efectúa con arreglo a un esquema que resulta del estudio del arrollamiento en cuestión. Un gran número de esquemas de conexión se presentan en la segunda parte de este volumen, a partir de la página 217.

7. El arrollamiento trifásico como conjunto de devanados monofásicos

Como hemos venido diciendo repetidamente, un arrollamiento trifásico está constituido por tres devanados monofásicos, idénticos e independientes entre sí hasta el momento de su conexión, pero situados en las ranuras de la máquina eléctrica de tal modo que, cada uno, se encuentra desplazado respecto al anterior y al que le sigue, 120 grados eléctricos. Prescindiendo de este desfase, cada devanado monofásico es (eléctricamente) una repetición exacta de cualquiera de los otros dos que componen el arrollamiento trifásico.

8. Etapas del bobinado de una máquina eléctrica rotativa

Aunque este epígrafe lo desarrollaremos extensamente en el capítulo III de la tercera parte (Procesos del bobinado de máquinas eléctricas), conviene fijar ya algunas ideas.

El proceso del bobinado de una máquina eléctrica rotativa consta, en la mayoría de los casos, de tres etapas bien diferenciadas:

1.ª Construcción (devanado) de las bobinas y de los grupos que compondrán el arrollamiento total.

2.ª Preparación y aislamiento de las ranuras de la máquina (del estator o del rotor) donde se alojarán los lados de las bobinas.

3.ª Colocación de las bobinas y grupos, y conexión de los mismos.

Para poder realizar cada una de las etapas mencionadas, el bobinador precisa conocer una serie de datos previos del arrollamiento, tales como:

— Diámetro de los conductores y clase de su aislamiento.
— Número de conductores por bobina.
— Dimensiones y forma geométrica de las bobinas.
— Número de bobinas y grupos (éstos con su número parcial de bobinas).
— Clase de aislamiento previsto para las ranuras.
— Dimensiones geométricas de las ranuras.
— Orden en que deben situarse las bobinas y grupos en las ranuras (o sea, plan del arrollamiento).
— Paso del devanado.
— Esquema de las conexiones a realizar, etc.

9. Ejecución práctica del arrollamiento

Una vez conocidos todos los datos precisos, la ejecución práctica del arrollamiento es cuestión de habilidad y experiencia, lo que no es poca cosa. El abaratamiento de las máquinas eléctricas rotativas, así como la rentabilidad de los trabajos de reparación, dependen esencialmente del tiempo invertido en los procesos del bobinado, antes mencionados.

Aunque cada máquina eléctrica rotativa, de acuerdo con sus datos eléctricos nominales (potencia, tensión, factor de potencia, etc.), exige un determinado arrollamiento, las máquinas con el mismo número de polos, fases y ranuras, disponen de arrollamientos que, a menudo, solamente se diferencian en el número y diámetro de los conductores de sus bobinas respectivas.

Esto permite al bobinador disponer de una serie de *planes de arrollamientos* (ver cap. VII) válidos para todas aquellas máquinas eléctricas que tienen las mismas variables mencionadas.

El plan del arrollamiento es de una importancia decisiva para el bobinador, ya que le proporciona de modo sistemático el número de bobinas y grupos que compone cada devanado parcial, así como el orden de colocación de dichas bobinas y grupos, y las conexiones a efectuar.

El plan del arrollamiento depende, en esencia, de las tres variables siguientes:

— Número de polos: $2p$.
— Número de fases: m.
— Número de ranuras: N.

10. Número de polos

En general viene obligado por los datos nominales de la máquina, ya que entre la velocidad n sincrónica, la frecuencia f de la corriente alterna, y el número p de pares de polos existe la relación conocida:

$$n = 60 \cdot f/p$$

La velocidad sincrónica suele ser dato fijo, así como la frecuencia. De este modo, el valor del número total de polos $2p$ viene obligado en cada máquina.

11. Número de fases

Cuando nos refiramos a arrollamientos trifásicos, el número de fases será siempre $m = 3$.

Entonces, cada arrollamiento se compondrá de tres devanados monofásicos independientes, con tres principios U, V y W, y tres finales X, Y y Z. Los mencionados devanados parciales serán siempre idénticos, y estarán defasados entre sí 120 grados eléctricos.

12. Número de ranuras

Nos referimos al número total N de ranuras donde deberá insertarse el arrollamiento en cuestión.

Si el problema consiste en rebobinar una máquina eléctrica, el número N de ranuras viene impuesto. Si la máquina es nueva, el número N de ranuras se puede escoger, en general, entre números muy diferentes; en este último caso es cuestión que resuelve el cálculo eléctrico de la máquina.

Entre dos ranuras (del estator o del rotor) consecutivas existe un cierto número de grados eléctricos que es interesante que el bobinador sepa determinar.

El número de grados geométricos entre dos ranuras consecutivas es siempre $360/N$, ya que las N ranuras están uniformemente distribuidas en los 360 grados que tiene una circunferencia.

El número de grados eléctricos entre dos ranuras consecutivas será, así, de $360 \cdot p/N$ (ver cap. IV, § 2).

Ejemplo:

Calcular el número de grados eléctricos existentes entre dos ranuras consecutivas de una máquina eléctrica de $N = 36$ ranuras y $2p = 4$ polos.

Se tiene:

$360 \cdot p/N = 360 \cdot 2/36 = 20$ grados eléctricos entre dos ranuras consecutivas.

13. Otros factores a tener en cuenta

Además de las variables mencionadas, que constituyen el punto de partida para la determinación del plan del arrollamiento de cualquier máquina eléctrica rotativa, existen dos importantes factores que conviene examinar shora, ya que irán apareciendo a lo largo de los capítulos siguientes. Son:

— Paso del devanado.
— Número de ranuras por polo y fase.

14. Paso del devanado

Al situar una bobina en el estator, o rotor, de una máquina eléctrica, uno de los lados de dicha bobina se aloja en una de las ranuras, mientras que el otro lado se alberga en otra ranura situada a cierta distancia de la primera (fig. 41).

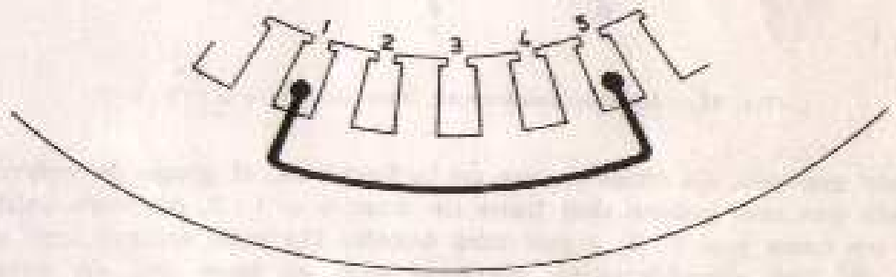


Fig. 41. — Concepto de paso del devanado. Paso de cuatro ranuras, o sea, $y = 1 : 5$.

La distancia, medida en número de ranuras, existente entre dos ranuras que albergan, cada una, diferentes lados de una misma bobina, se llama paso y del devanado.

En la figura 41, por ejemplo, el paso del devanado es de cuatro ranuras. Si se numeran sucesivamente las ranuras (1, 2, 3, . . . N), nombrando cada vez con el número 1 la ranura que contiene uno de los lados de la bobina, el paso del devanado se puede expresar mediante dos números que corresponden a las ranuras que contienen lados diferentes de una misma bobina.

Así, en la figura 41, el paso del devanado se escribe $y = 1:5$, lo que indica que entre los lados de la bobina hay cuatro ranuras.

Como se verá, en algunos arrollamientos el paso es constante para todas las bobinas y grupos de los devanados. En otros arrollamientos, por el contrario, hay bobinas de distinto ancho y, en consecuencia, diferentes pasos del devanado.

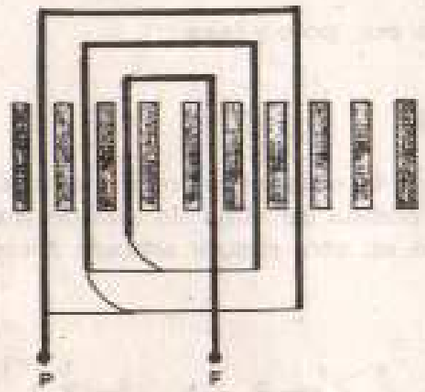


Fig. 42. — Bobinas concéntricas. Paso variable $y = 1:3:5:7$.

Así, por ejemplo, se observa que en la figura 42, el grupo de bobinas está formado por una bobina que tiene un paso $y = 1:3$, por otra bobina que tiene un paso $y = 1:5$, y por otra bobina (la más ancha) con un paso $y = 1:7$. Por simplificación, diremos que el paso es, en este caso, $y = 1:3:5:7$.

Con lo anterior, se ha explicado la nomenclatura utilizada al referirnos al paso del devanado, nomenclatura que se utilizará en lo que sigue.

Distinguiremos entre:
- — paso diametral,
- — paso acortado, y
- — paso alargado.

15. Paso diametral

Es el paso natural de un devanado. Se obtiene siempre dividiendo el número total N de ranuras por el número de polos $2p$.

Así, por ejemplo, una máquina de $N = 24$ ranuras y $2p = 4$ polos tiene un paso diametral de $N/2p = 24/4 = 6$ ranuras, o sea, $y = 1:7$.

No siempre es posible ejecutar un paso diametral, ya que — al venir el paso medido en ranuras — es forzoso que el paso sea un número entero, lo que no siempre sucede con el paso diametral.

Por ejemplo, en una máquina de $N = 27$ ranuras y $2p = 2$ polos, no se puede realizar un paso diametral, ya que habría que dejar entre los dos lados de cada bobina $N/2p = 27/2 = 13{,}5$ ranuras, y esto no es posible.

16. Paso acortado

Se ejecuta un paso acortado cuando se toma un paso que contenga menos ranuras intermedias de las que requiere el paso diametral.

Por ejemplo, en una máquina de $N = 30$ ranuras y $2p = 2$ polos, el paso diametral sería $N/2p = 30/2 = 15$, o sea, $y = 1:16$.

Realizaríamos un paso acortado (en una ranura) si tomásemos $y = 1:15$. También sería un paso acortado (ahora en dos ranuras) si se toma $y = 1:14$, etc.

En general, nunca conviene acortar el paso en un número excesivo de ranuras. Existe un acortamiento óptimo sobre el que ya se hablará (capítulo V de la tercera parte).

17. Paso alargado

Consiste en tomar un paso que contenga más ranuras intermedias de las que requiere el paso diametral.

Por ejemplo, en una máquina de $N = 30$ ranuras y $2p = 6$ polos, el paso diametral sería $N/2p = 30/6 = 5$, o sea, $y = 1:6$.

Un paso alargado (en una ranura) lo realizaríamos al tomar $y = 1:7$. También sería un paso alargado (ahora en dos ranuras) si se toma $y = 1:8$.

En general, aunque el paso alargado proporciona todas las ventajas que se buscan con el paso acortado, aquél se emplea mucho menos que el acortado; entre otras razones porque exige mayor gasto de cobre conductor (bobinas más anchas).

18. Número de ranuras por polo y fase

Se define como número q de ranuras por polo y fase, al cociente:

$$q = N/2pm$$

Cuando tratemos de arrollamientos trifásicos, será siempre $m = 3$, y así resultará:

$$q = N/6p$$

CAPITULO VII

PLAN DEL ARROLLAMIENTO Y CLASIFICACION DE LOS ARROLLAMIENTOS DE CORRIENTE ALTERNA

1. Introducción

Comenzaremos este capítulo explicando qué se entiende por plan del arrollamiento, esquema del que ya se ha destacado su importancia, y que nos permitirá reconocer más fácilmente las diferencias existentes entre las diversas clases de los arrollamientos empleados en la práctica.

A continuación haremos una clasificación formal de los arrollamientos basándonos en las principales características de los mismos, y no en detalles secundarios de su aspecto.

Prescindiremos, pues, de los interminables nombres (arrollamientos de tonel, cesto, corona, rejilla, etc.) que se prestan a confusiones, e intentaremos una normalización de la nomenclatura, de modo que cualquier arrollamiento quede incluido en la clasificación.

Detallaremos después cada uno de los tipos clasificados, y terminaremos el capítulo con un cuadro sinóptico que proporcione una perspectiva de conjunto.

2. Plan del arrollamiento

El plan del arrollamiento es una representación esquemática, dibujada en un plano, de las ranuras del estator, o rotor, donde se han de insertar los devanados, así como de las bobinas y grupos tal como quedarán dispuestos al concluir el arrollamiento, indicando también las conexiones pertinentes.

A este respecto, las ranuras se representan por puntos alineados que numeraremos consecutivamente: 1, 2, 3, . . . N, en el mismo orden que ocupan en el estator o rotor. La ranura N coincide, evidentemente, con el número total de ranuras de la parte fija, o móvil, de la máquina.

Las bobinas se representarán simplificadamente, como si solamente constasen de un conductor único, dibujando cada lado de cada bobina encima de la ranura en la cual se insertará, e indicando, además, cuál es el sentido de la corriente en cada lado.

Las cabezas de las bobinas se representarán simplificadamente, prescindiendo de su forma exacta definitiva, y dibujándolas solamente en el lado de encima de las ranuras, dejando el lado inferior para dibujar las conexiones entre bobinas y grupos de bobinas, así como los principios U, V y W, y los finales X, Y y Z de los devanados.

Como ejemplo, se ha dibujado el plan del arrollamiento correspondiente a una máquina de $N = 36$ ranuras, $2p = 4$ polos y $m = 3$ fases (fig. 43).

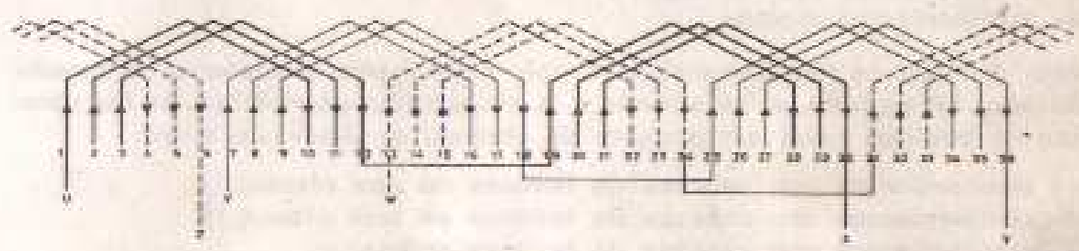


Fig. 43. — Plan del arrollamiento trifásico para N = 36 ranuras y 2p = 4 polos (con bobinas iguales).

El método a seguir para la obtención de este esquema se estudiará más adelante. Destacaremos ahora que a la vista del plan del arrollamiento se deducen importantes datos para el bobinador:

— Número de bobinas y grupos de bobinas que hay que devanar.
— En qué ranura hay que situar cada lado de cada bobina.
— Dónde están situados los terminales.
— Qué conexiones hay que efectuar.

En el ejemplo de la figura 43, habría que devanar un total de 6 grupos de bobinas con tres bobinas por grupo (hay dos grupos para cada devanado parcial).

El paso del devanado es aquí constante, $y = 1 : 10$, o sea, de 9 ranuras. Los principios de cada grupo de bobinas y los de cada devanado monofásico quedan claramente indicados, así como las conexiones que hay que efectuar entre los grupos de bobinas.

De la observación de la figura 43 se desprende, además, que no es necesario dibujar las cabezas de bobinas en el lado debajo de las ranuras, ya que no caben dudas respecto a su situación, y se tiene la ventaja de que quedan más claras las conexiones y el esquema.

3. Clasificación de los arrollamientos de corriente alterna

Se pueden hacer diversas clasificaciones según se atienda a unos u otros factores. Estableceremos las siguientes:

Considerando el número de lados de bobinas que alberga cada ranura, los arrollamientos se dividen en:

— arrollamientos a una capa,
— arrollamientos a dos capas, y
— arrollamientos mixtos.

Esta división es fundamental, y la que mayormente caracteriza el arrollamiento. Ahora bien, si se atiende a la disposición geométrica de las cabezas de bobinas fuera del paquete de chapas, se distingue entre:

— arrollamientos con cabezas de bobinas en dos planos,
— arrollamientos con cabezas de bobinas en tres planos, y
— arrollamientos con cabezas de bobinas solapadas.

Atendiendo al paso del devanado, es decir, al ancho de las bobinas que constituyen el arrollamiento, distinguiremos entre:

— arrollamientos con bobinas de paso constante, y
— arrollamientos con bobinas de paso variable.

Y, finalmente, considerando el valor del número q de ranuras por polo y fase, los arrollamientos se llaman:

— arrollamientos enteros (cuando q es un número entero), y
— arrollamientos fraccionarios (cuando q no es entero).

4. Arrollamientos a una capa

Son aquellos en los cuales un lado de bobina ocupa por entero toda su ranura. Cada ranura alberga, pues, todos los conductores que componen un lado de una bobina, y nada más que dichos conductores (fig. 44).

Como cada bobina tiene dos lados, es claro que el número total de bobinas de los arrollamientos a una capa es igual a la mitad del número de ranuras de la máquina.

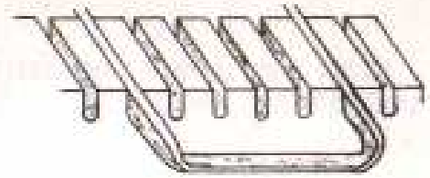


Fig. 44. — En los arrollamientos a una capa, cada una de las ranuras alberga un solo lado de bobina.

Según que las bobinas que componen el arrollamiento a una capa tengan el mismo paso o que éste sea variable, se dirá que se trata de un arrollamiento a una capa con:

— bobinas de paso constante, o con
— bobinas de paso variable.

Los arrollamientos a una capa con bobinas de paso constante (como es el caso del ejemplo de la figura 43) suelen disponerse con las cabezas de bobinas solapadas. Las bobinas que tienen el mismo paso son, lógicamente, iguales entre sí; de modo que estos arrollamientos constan de bobinas que son todas idénticas, aunque cada grupo pueda llevar diferente número de bobinas.

Los arrollamientos a una capa con bobinas de paso variable se disponen, a veces, con las cabezas de bobinas distribuidas en dos planos (fig. 45):

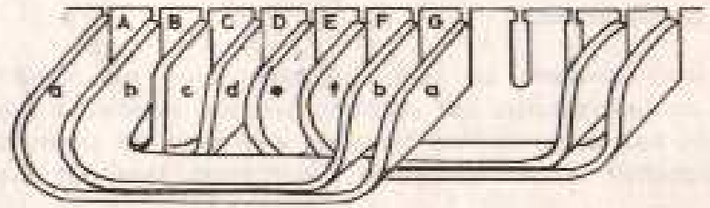


Fig. 45. — Cabezas de bobinas dispuestas en dos planos.

otras veces, las cabezas de bobinas se sitúan en tres planos (fig. 46); también es posible disponerlos con grupos de bobinas solapados (fig. 47).

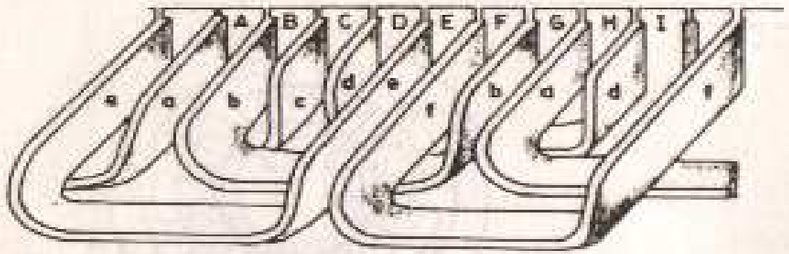


Fig. 46. — Cabezas de bobinas dispuestas en tres planos.

Cuando las bobinas tienen paso variable, los grupos de bobinas del arrollamiento están formados por bobinas dispuestas concéntricamente, esto

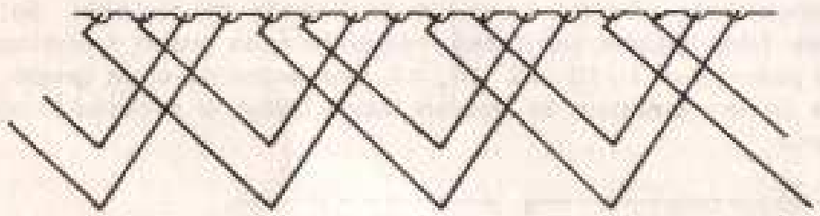


Fig. 47. — Arrollamiento a una capa, con bobinas trapeciales concéntricas. Cada grupo de bobinas está solapado con el anterior.

es, unas dentro de otras (fig. 42), cualquiera que sea su forma (circular, trapecial, exagonal, etc.). Es por esto que en estos casos se habla de bobinas concéntricas.

En las máquinas medianas y pequeñas, cuando se utilizan bobinas formadas por hilos de cobre esmaltado, aunque las cabezas de bobinas estén distribuidas en dos o tres planos, se apoyan siempre unas sobre otras (con un aislante intermedio). En las figuras, sin embargo, para que no aparezcan superpuestas las cabezas de bobinas y se puedan distinguir entre sí, se dibujan siempre a diferentes alturas.

En la figura 48 se ha representado el plan del arrollamiento correspondiente a una máquina de $N = 36$ ranuras, $2p = 4$ polos y $m = 3$ fases (es decir, para los mismos datos iniciales de la figura 43), ejecutando el arrollamiento a una capa, con bobinas de paso variable y cabezas en dos planos.

Cómo se llega a obtener dicho plan del arrollamiento, se estudiará más adelante. Ahora interesa observar que, comparando las figuras 43 y 48, *los lados de las bobinas están todos (para cada fase) situados exactamente en las mismas ranuras en ambos esquemas, teniendo además idéntico sentido de circulación de corriente.*

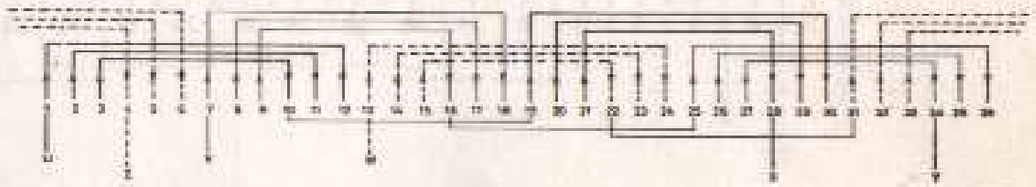


Fig. 48. — Plan del arrollamiento para los mismos datos de la figura 43, pero previsto con bobinas concéntricas y cabezas dispuestas en dos planos.

Es decir: si borrásemos de ambos arrollamientos las cabezas de bobinas y las conexiones, lo que quedaría de ambos planes de arrollamientos sería idéntico. Esta identidad que destacamos ahora, y sobre la que insistiremos más adelante, será el punto de partida que nos permitirá dibujar el plan del arrollamiento de cualquier máquina eléctrica rotativa.

Volviendo a los arrollamientos a una capa:

Cuando en éstos el número p de pares de polos es impar (o sea: para máquinas con 2, 6, 10, ... polos), y se desea ejecutar el arrollamiento distribuyendo las cabezas de bobinas en dos planos, sucede que, si se trabaja con cobre de gran sección (pletinas, litze), *es necesario curvar las cabezas de bobinas de uno de los grupos de una fase (bobinas cojas).* Trabajando con hilos de cobre esmaltado, no hay necesidad de curvar ninguna bobina, y las cabezas se superponen sin más, ordenadamente.

Lo dicho puede comprobarse en la figura 49, *a* y *b*, que representa el plan del arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos, correspondiente a una máquina con $N = 36$ ranuras, $2p = 6$ polos ($p = 3$, número impar), y $m = 3$ fases.

En la figura 49*a*, situada a la izquierda, observamos el plan del arrollamiento. La primera fase se ha dibujado, como siempre, de trazo grueso; la segunda fase, de trazo fino; la tercera fase de trazo discontinuo. El último grupo de bobinas de la tercera fase consta de dos bobinas cojas.

La figura 49b, situada a la derecha, presenta la situación de las cabezas de bobinas en una vista frontal de la máquina (o sea, vista al quitar uno de los escudos de la carcasa).

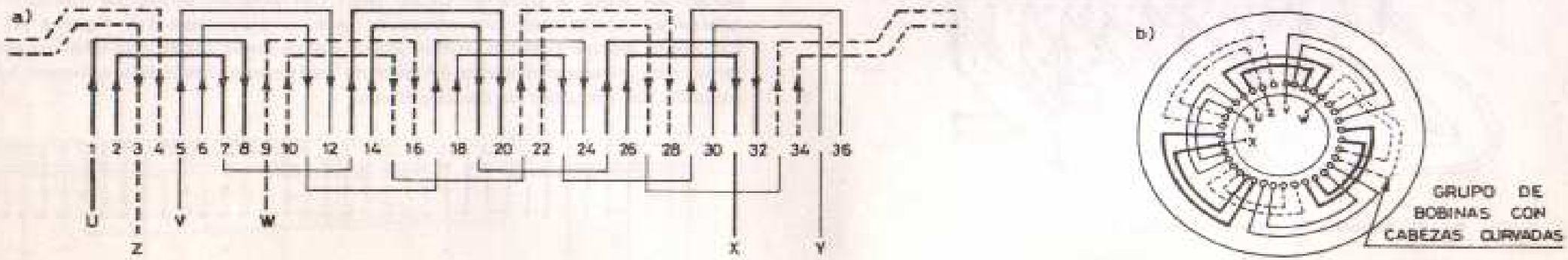


Fig. 49. — a) Plan del arrollamiento trifásico para N = 36 y 2p = 6, resuelto en dos planos. Obsérvese la curvatura de las cabezas de bobina de un grupo. b) Vista frontal del arrollamiento dispuesto en el estator.

5. Arrollamientos a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos

Para comprender sin dificultad los arrollamientos a una capa con cabezas de bobinas distribuidas en tres planos, resulta conveniente ver cómo se generan a partir de los de cabezas de bobinas situadas en dos planos.

Consideremos el plan del arrollamiento (fig. 50) para una máquina con $N = 48$ ranuras, $2p = 4$ polos y $m = 3$ fases, previsto a una capa con cabezas de bobinas en dos planos.

Este arrollamiento consta, como se desprende de su plan, de 6 grupos de bobinas (dos grupos por fase), teniendo cada grupo 4 bobinas concéntricas de pasos $y = 1 : 10 : 12 : 14 : 16$. Los lados de cada grupo, al formar la cabeza de las bobinas, se doblan todos hacia la derecha o todos hacia la izquierda.

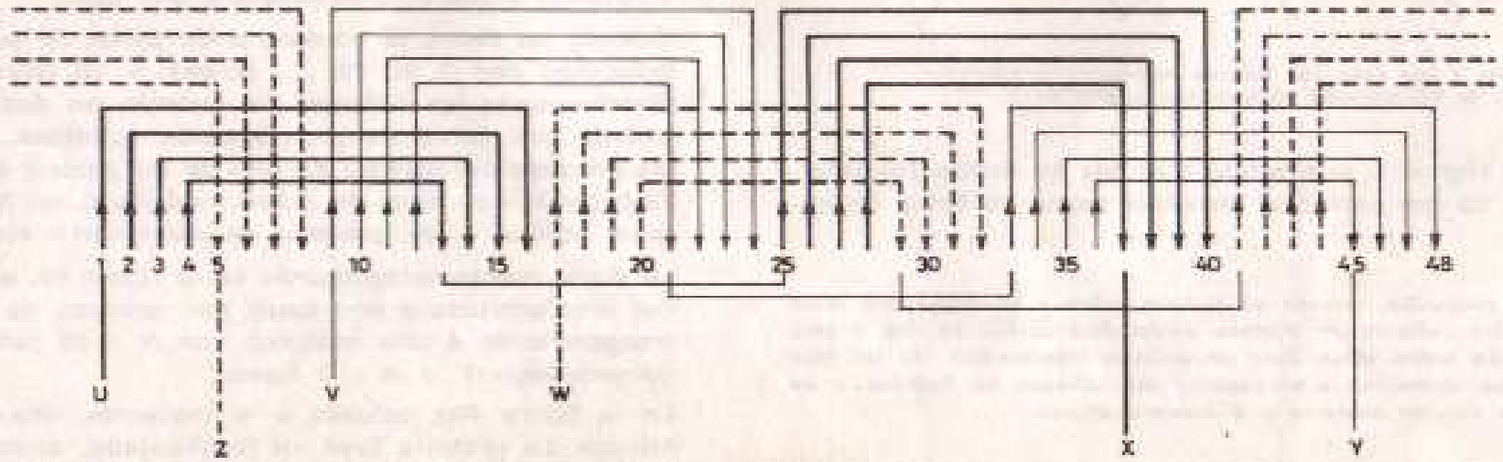


Fig. 50. — Plan del arrollamiento para N = 48 ranuras, 2p = 4 polos y m = 3 fases, previsto a una capa, con cabezas de bobinas dispuestas en dos planos.

Atendamos también a la figura 51 que representa el plan del arrollamiento de una máquina idéntica a la anteriormente citada, pero previsto a una capa con cabezas de bobinas en tres planos.

figuras serían idénticas; es decir: los lados de las bobinas están todos (para cada fase) situados exactamente en las mismas ranuras en ambos esquemas, incluso con idéntico sentido de circulación de corriente.

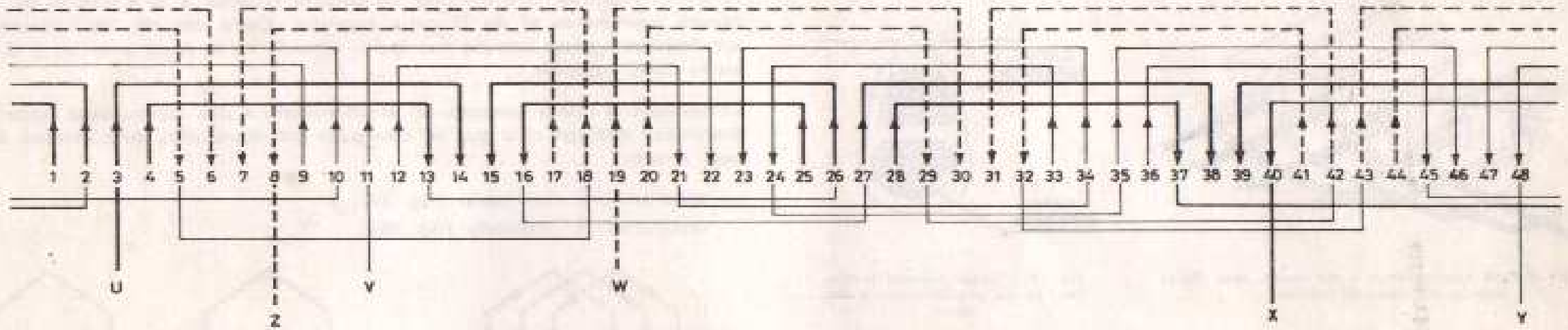


Fig. 51. — Plan del arrollamiento para los mismos datos de la figura 50 ($N = 48$, $2p = 4$, $m = 3$), pero con las cabezas de bobinas dispuestas en tres planos.

De la comparación de ambos planes de arrollamientos se deduce que cada grupo de bobinas de la figura 50 se ha transformado en dos grupos en la figura 51. Así, el primer grupo de bobinas de la figura 50, formado por 4 bobinas concéntricas que van de las ranuras 1-2-3-4 a las ranuras 13-14-15-16, se ha subdividido en la figura 51 como sigue:

— un grupo de dos bobinas que va de las ranuras 1-2 hacia la izquierda, y
— un grupo de dos bobinas que va de las ranuras 3-4 hacia la derecha.

Análoga subdivisión puede observarse comparando cualquier otro grupo de 4 bobinas de la figura 50 con los dos grupos que resultan de él en la figura 51.

El número total de bobinas es el mismo en ambos arrollamientos; en cambio, mientras en el arrollamiento en dos planos hay en total 6 grupos de 4 bobinas (2 grupos por fase), en el arrollamiento en tres planos hay un total de 12 grupos de 2 bobinas (4 grupos por fase).

De la comparación de las figuras 50 y 51, se desprende también que, borrando las cabezas de bobinas y las conexiones de ambos planes, las

Por comparación de las figuras 45 y 46 (donde para mejor comprobación se han asignado letras a los dientes y a las bobinas), se comprende también la generación del arrollamiento con cabezas de bobinas en tres planos a partir del de cabezas en dos planos.

6. Arrollamientos a dos capas

Son aquellos en los cuales cada ranura alberga dos lados de bobinas, cada lado perteneciente a una bobina diferente (fig. 52).

Como cada bobina consta de dos lados, resulta que, en estos arrollamientos, el número total de bobinas coincide con el de ranuras N de la máquina. Para las mismas condiciones iniciales (o sea, para los mismos valores de N, $2p$ y m), los arrollamientos a dos capas requieren, pues, doble número de bobinas que los correspondientes arrollamientos a una capa.

Aunque corrientemente los arrollamientos a dos capas se ejecutan con bobinas iguales de paso constante, hay casos particulares en los que se prefiere utilizar bobinas de paso variable. En ambos casos, las cabezas

de bobinas no aparecen dispuestas en planos diferentes sino que, en el caso de bobinas de paso variable se solapan las cabezas, y en el caso de bobinas de paso constante las cabezas se ordenan unas tras otras.

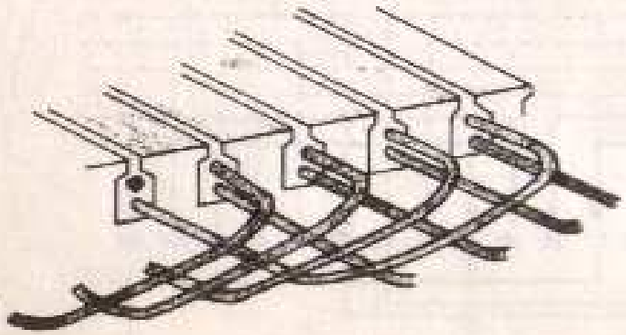


Fig. 52. — En los arrollamientos a dos capas, cada ranura alberga dos lados de bobinas.

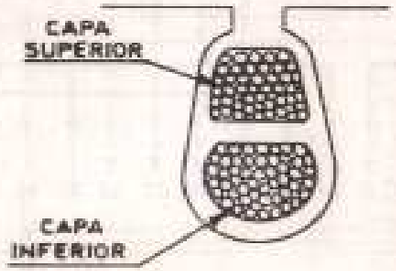


Fig. 53. — Capas superior e inferior, en los arrollamientos a dos capas.

Como en cada ranura se sitúa un lado de bobina sobre el otro de otra bobina (con un aislante intermedio), se distingue entre el lado de bobina colocado en lo más profundo de la ranura, que denominamos *capa inferior*, y el lado de bobina situado encima del anterior, que llamamos *capa superior* (fig. 53).

En la figura 54 se ha representado el plan del arrollamiento correspondiente a una máquina con los datos iniciales: $N = 12$, $2p = 2$ y $m = 3$, ejecutado a dos capas con bobinas de paso constante.

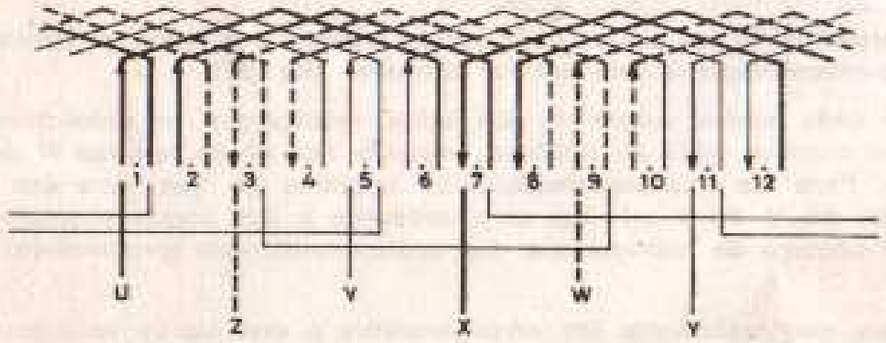


Fig. 54. — Plan del arrollamiento para N = 12, 2p = 2 y m = 3, a dos capas, con bobinas iguales.

Se observará que, en el esquema, sobre cada ranura se han dibujado dos lados de bobinas. En lo sucesivo admitiremos que el lado de bobina representado a la izquierda de cada ranura es el correspondiente a la capa inferior, mientras que el lado de bobina situado a la derecha de cada ranura representa el de la capa superior. Cada una de las bobinas del arrollamiento tiene uno de sus lados situado en la capa inferior, y el otro en la capa superior.

Atendiendo a cómo «avanza» el arrollamiento a dos capas, cabe hacer una distinción análoga a la que se cita para los devanados de corriente continua, o sea:

— arrollamiento imbricado (fig. 55), y
— arrollamiento ondulado (fig. 56).

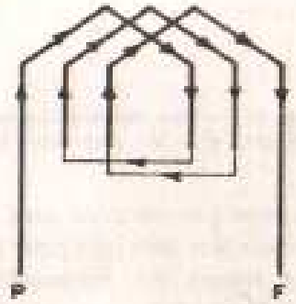


Fig. 55. — Grupo de bobinas en un arrollamiento imbricado.

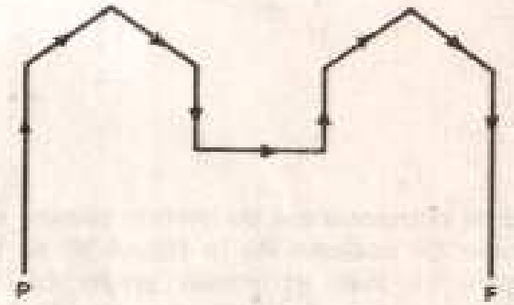


Fig. 56. — Grupo de bobinas de un arrollamiento ondulado.

El arrollamiento ondulado solamente se suele utilizar para máquinas de gran tamaño, por lo que presenta para nosotros menor interés. Así, siempre que no se exprese lo contrario, se entenderá que hablamos de arrollamientos imbricados, al referirnos a arrollamientos a dos capas.

7. Arrollamientos enteros y fraccionarios

En el capítulo VI, epígrafe 18, definimos el valor del número de ranuras por polo y fase, por la igualdad:

$$q = N/2p \cdot m$$

Según que el valor de q sea entero o fraccionario, los arrollamientos se denominan, respectivamente, enteros o fraccionarios.

Ejemplo:

Un arrollamiento para una máquina con los datos iniciales $N = 30$, $2p = 6$ y $m = 3$, resulta ser fraccionario, ya que se tiene:

$$q = N/2p \cdot m = 30/6 \cdot 3 = 30/18 = 1{,}666$$

Ejemplo:

Un arrollamiento para una máquina con los datos iniciales $N = 24$, $2p = 4$ y $m = 3$, resulta ser entero, ya que se tiene:

$$q = N/2p \cdot m = 24/4 \cdot 3 = 24/12 = 2$$

Los arrollamientos fraccionarios presentan ciertas ventajas respecto a los enteros, en cuanto se refiere al buen funcionamiento de algunas máquinas. El que el arrollamiento sea fraccionario no introduce ninguna dificultad en la determinación del plan del arrollamiento de acuerdo con el método que expondremos en el próximo capítulo.

El valor q de ranuras por polo y fase tiene en los arrollamientos enteros un significado muy importante, como vamos a ver. Consideremos para ello el plan del arrollamiento de la figura 43 (pág. 33), correspondiente a $N = 36$, $2p = 4$ y $m = 3$.

El valor de q es, en este caso: $q = N/2p \cdot m = 36/4 \cdot 3 = 3$, número entero, por lo que podríamos denominar el arrollamiento: entero, a una capa, con bobinas de paso constante.

Observando el número de bobinas de que consta cada grupo del arrollamiento, hallamos que este número es precisamente 3, o sea: igual al número q de ranuras por polo y fase.

Esto no es simple casualidad: En el plan del arrollamiento de la figura 48, para $N = 36$, $2p = 6$ y $m = 3$, cada grupo está constituido por 2 bobinas, mientras que el valor de q es: $q = N/2p \cdot m = 36/6 \cdot 3 = 2$, o sea: igual al número de bobinas de cada grupo.

Asimismo, en el plan del arrollamiento de la figura 50, para $N = 48$, $2p = 4$ y $m = 3$, cada grupo de bobinas consta de 4 bobinas; y el valor de q es: $q = N/2p \cdot m = 48/4 \cdot 3 = 4$.

Aunque solamente se ha verificado una comprobación en casos particulares, se cumple siempre, en los arrollamientos a una capa ejecutados con bobinas de paso constante, o con cabezas de bobinas en dos planos, que:

— *Cuando q es entero, representa el número de bobinas de que consta cada grupo del arrollamiento.*

Lo mismo se cumple para los arrollamientos enteros ejecutados a dos capas: pero, para los arrollamientos enteros a una capa con cabezas de bobinas situadas en tres planos, en razón de su generación (ver § 5), *el número q de ranuras por polo y fase es igual al doble del número de bobinas de cada grupo del arrollamiento.*

Comprobación:

Para el arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos, correspondiente al caso $N = 48$, $2p = 4$ y $m = 3$ (fig. 51), el número de bobinas de cada grupo es 2. El valor de q es: $q = N/2p \cdot m = 48/4 \cdot 3 = 4$, o sea: igual al doble del número de bobinas por grupo.

8. Arrollamientos mixtos

En la construcción de series de máquinas, interesa particularmente utilizar arrollamientos muy simples, de cómoda ejecución e inserción. Puede ocurrir, sin embargo, que por los datos iniciales de la máquina (N, $2p$ y m), los posibles arrollamientos a una o a dos capas no convengan suficientemente a las exigencias de facilidad de fabricación de los grupos de bobinas, comodidad de inserción del arrollamiento en la máquina, y poca posibilidad de errores en las conexiones a realizar.

En estos casos, es frecuente el empleo de arrollamientos que llamaremos mixtos, porque reúnen características de los arrollamientos a una y dos capas.

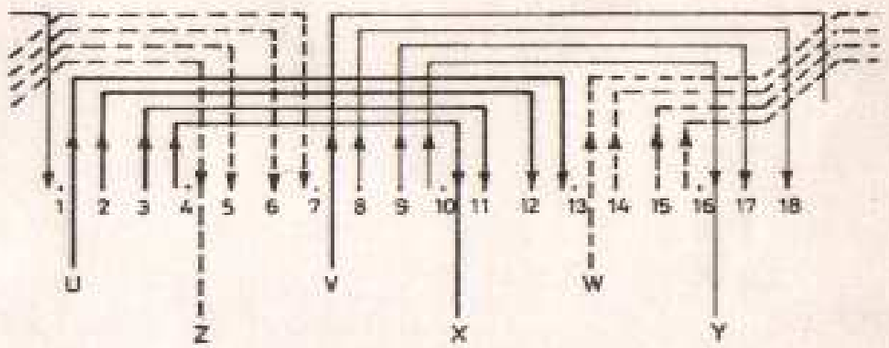


Fig. 57. — Arrollamiento mixto para N = 18 ranuras, 2p = 2 polos y m = 3 fases, con cabezas de bobinas en dos planos.

La figura 57 muestra el plan de un arrollamiento mixto para $N = 18$ ranuras, $2p = 2$ polos y $m = 3$ fases, ejecutado con cabezas de bobinas en dos planos.

Se observa que está constituido por grupos de bobinas concéntricas, y que mientras los lados de las bobinas mayores de cada grupo ocupan por entero toda su ranura (característica de los arrollamientos a una capa), por el contrario, los lados de las bobinas menores de cada grupo comparten su ranura, cada uno, con un lado de bobina de otro grupo (característica de los arrollamientos a dos capas).

Como el número total de conductores que contiene cada ranura debe ser el mismo, resulta que:

— mientras en los arrollamientos a una y dos capas todas las bobinas constan del mismo número de conductores,
— en los arrollamientos mixtos no todas las bobinas llevan el mismo número de conductores.

Así, en la figura 57, las bobinas mayores del arrollamiento constan de doble número de conductores que las bobinas menores. Esta diferencia en el número de conductores de las bobinas no representa ningún problema de ejecución para el taller de bobinado.

Los arrollamientos mixtos se pueden ejecutar con cabezas de bobinas en dos planos, o con cabezas en tres planos, y, también, con bobinas de paso constante; o sea, en general, como los arrollamientos a una y dos capas.

Para evitar al lector toda posibilidad de confusión, consideraremos los arrollamientos mixtos aparte (capítulo X, parte III), de modo que los excluiremos del método general para obtener el plan del arrollamiento.

9. Resumen conjunto de los tipos de arrollamientos

- Arrollamientos de corriente alterna
  - Arrollamientos a una capa
    - — Cabezas en 2 planos
    - — Cabezas en 3 planos
    - — Cabezas solapadas
  - Arrollamientos a dos capas
    - — Paso constante
    - — Paso variable
  - Arrollamientos mixtos
    - — Cabezas en 2 planos
    - — Cabezas en 3 planos
    - — Cabezas solapadas

CAPITULO VIII

METODO DE LA ESTRELLA DE RANURAS PARA DETERMINAR EL PLAN DEL ARROLLAMIENTO

1. Introducción

El método que seguiremos para la determinación sistemática del plan del arrollamiento de cualquier máquina eléctrica rotativa, se conoce con el nombre de *método de la estrella de ranuras*.

En este capítulo daremos, primeramente, unas breves indicaciones sobre los fundamentos teóricos del método. Esta parte teórica inicial *no es imprescindible para aprender a realizar el método*, al igual que no es necesario conocer la ley de Ohm para dar al interruptor de la luz.

A continuación, expondremos qué pasos hay que dar para construir la estrella de ranuras, citando seguidamente las reglas para distribuir la estrella entre los devanados parciales.

Ello nos pondrá en condiciones para determinar y dibujar el plan del arrollamiento, por complicado que éste sea.

A lo largo del capítulo menudearán los ejemplos prácticos, para la mejor comprensión de lo expuesto.

2. Fundamentos teóricos del método de la estrella de ranuras

Como la tensión inducida en los lados de las bobinas del arrollamiento de una máquina eléctrica varía sinusoidalmente, es posible representar la tensión mencionada por un vector giratorio en un plano.

Las tensiones inducidas en lados de bobinas que se encuentran insertados en ranuras contiguas, están defasadas entre sí tantos grados eléctricos como equivalen a los grados geométricos que median entre las dos ranuras consideradas.

Siendo N el número total de ranuras, y p el número de pares de polos, las tensiones inducidas en dos lados de bobinas situados en ranuras contiguas tendrán un desfase mutuo de (cap. VI, § 12):

$$\text{alfa} = \alpha = 360 \cdot p/N$$

Representando cada tensión por un vector, los vectores correspondientes a tensiones de lados de bobinas situados en ranuras contiguas se dibujarán formando entre sí un ángulo α.

Si el número N total de ranuras y el número p de pares de polos son primos entre sí, no será posible encontrar dos ranuras en los conductores de las cuales se engendren tensiones de la misma fase. En cada lado de bobina se inducirá, en este caso, una tensión diferente (en fase) de modo que, al dibujar las tensiones por vectores, aparecerán tantos vectores como ranuras haya, o sea, N vectores.

Si, por el contrario, N y p admiten un divisor común t (distinto de la unidad), resultará que en cada N/t ranuras encontraremos un conductor (lado de bobina) que se hallará en idéntica situación eléctrica respecto al primero considerado.

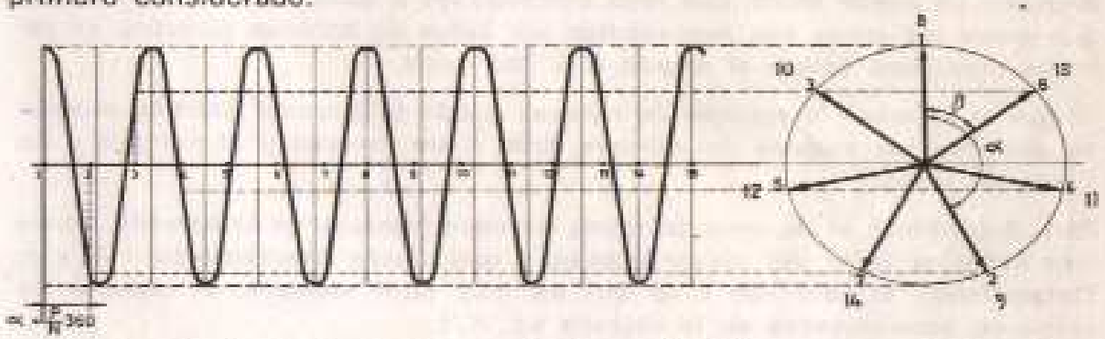


Fig. 58. — Estrella de ranuras para una máquina con N = 14 ranuras y p = 5 pares de polos. La estrella está formada por un total de 14 rayos (vectores) de los cuales cada dos están superpuestos. Así, por ejemplo, los rayos 1 y 8 están superpuestos, lo que indica que las tensiones generadas en los lados de bobinas de las ranuras 1 y 8 son idénticas, en amplitud y en fase.

En este caso, al representar las tensiones por vectores, algunos de éstos se encontrarán superpuestos. El número de vectores no superpuestos será N/t, o sea, se repetirán t veces cada uno de ellos.

El ángulo existente entre dos vectores consecutivos será:

$$\text{beta} = \beta = 360 \cdot t/N$$

y, como antes, el ángulo entre dos vectores representativos de las tensiones generadas en los conductores situados en dos ranuras contiguas, será:

$$\alpha = 360 \cdot p/N$$

La figura 58 representa la estrella de ranuras para una máquina con $N = 14$ ranuras y $p = 6$ pares de polos, o sea, con $t = 2$.

3. Método práctico para dibujar la estrella de ranuras

De la parte teórica explicada apretadamente en el epígrafe anterior, se obtiene una conclusión práctica muy importante que es la que verdaderamente tiene interés para el bobinador:

Las tensiones generadas en los lados de las bobinas pueden ser representadas por rayos (vectores) defasados entre sí. Dichos rayos son los que forman la estrella de ranuras.

El número de rayos no superpuestos que entran en la estrella es de N/t. Dos rayos consecutivos están defasados entre sí un ángulo $\beta = 360 \cdot t/N$. Siempre se puede saber qué rayo corresponde a cada lado de bobina porque entre los rayos que representan los lados de bobinas situados en ranuras contiguas existe el ángulo $\alpha = 360 \cdot p/N$.

Según lo anterior, la estrella de ranuras queda totalmente definida cuando se conocen los valores del número total N de ranuras y el número p de pares de polos.

Para determinar el número de rayos no superpuestos de la estrella, basta con hallar el valor del mayor número t que divide exactamente a N y p. Determinado el valor de t, lo que es muy fácil siempre, el número de rayos no superpuestos de la estrella es: N/t.

Ejemplos:

A continuación se calcula el número N/t de rayos de la estrella de ranuras para diversos pares de valores de N y p:

Para $N = 12$ y $p = 1$, resulta $t = 1$, con lo que $N/t = 12/1 = 12$ rayos.
Para $N = 18$ y $p = 4$, resulta $t = 2$, con lo que $N/t = 18/2 = 9$ rayos.
Para $N = 36$ y $p = 1$, resulta $t = 1$, con lo que $N/t = 36/1 = 36$ rayos.

En cuanto que se conoce el número de rayos no superpuestos, puede dibujarse la estrella de ranuras teniendo en cuenta que entre dos rayos contiguos existe un ángulo $\beta = 360 \cdot t/N$.

Así, para los ejemplos anteriores resulta, respectivamente:

$\beta = 360 \cdot t/N = 360 \cdot 1/12 = 30$ grados.
$\beta = 360 \cdot t/N = 360 \cdot 2/18 = 40$ grados.
$\beta = 360 \cdot t/N = 360 \cdot 1/36 = 10$ grados.

Numerando ahora todas las ranuras consecutivamente: 1, 2, 3, . . ., N, resta ahora determinar qué rayo de la estrella corresponde a cada ranura.

Esta determinación es muy sencilla, ya que sabemos que entre ranuras contiguas existe un ángulo $\alpha = 360 \cdot p/N$. Para mayor claridad lo resolveremos en varios ejemplos prácticos que se exponen seguidamente.

4. Ejemplo 1.º Caso de una máquina con N = 12 ranuras y p = 1 par de polos

Como siempre sucede cuando la máquina es bipolar, se tiene aquí que $t = 1$. Así, el número de rayos no superpuestos de la estrella es $N/t = 12/1 = 12$.

El ángulo existente entre dos rayos contiguos es $\beta = 360 \cdot t/N = 360 \cdot 1/12 = 30°$.

Con estos datos podemos ya dibujar la estrella de ranuras correspondiente a este caso, obteniendo la figura 59, como fácilmente comprenderá el lector.

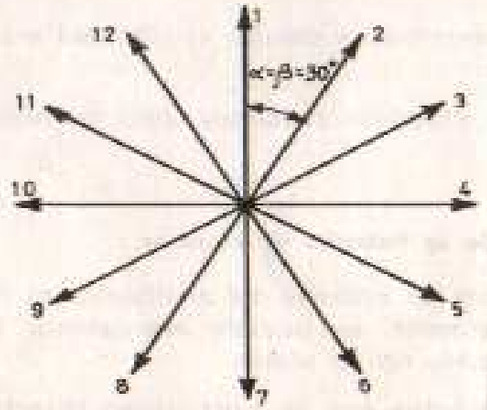


Fig. 59. — Estrella de ranuras para N = 12 y p = 1. Se tiene: t = 1; N/t = 12 rayos; α = β = 30 grados.

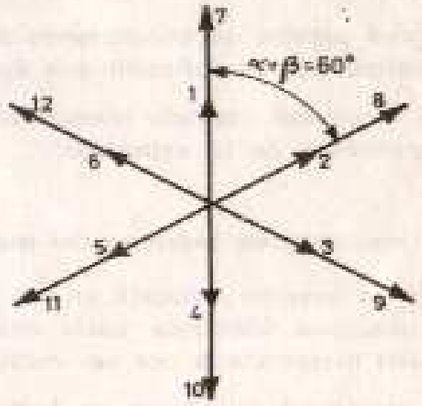


Fig. 60. — Estrella de ranuras para N = 12 y p = 2. Se tiene: t = 2; N/t = 6 rayos; α = β = 60 grados.

Resta ahora proceder a la numeración de los rayos dibujados, es decir, hay que determinar qué rayo corresponde a cada una de las 12 ranuras.

Para ello (fig. 59), escogemos un rayo cualquiera al azar, entre los de la estrella, y lo designamos por rayo 1, es decir, como el correspondiente a la tensión inducida en el lado de bobina situado en la ranura 1.

El rayo que representa la tensión inducida en el lado de bobina situado en la ranura 2, hemos dicho que forma un ángulo de $\alpha = 360 \cdot p/N$ con el rayo 1.

En nuestro caso $\alpha = 360 \cdot 1/12 = 30°$, valor que coincide con el del ángulo β.

De este modo, el rayo 2 será precisamente el siguiente al 1 en la estrella de la figura 59. Por idéntica razón, el rayo 3 será el siguiente al 2, etc.

Dibujada la estrella de ranuras y numerados correctamente todos sus rayos, se ha concluido una importante parte del proceso para dibujar el plan del arrollamiento. Resta ahora determinar entre todos los rayos numerados de la estrella cuáles son los que corresponden a cada devanado parcial, y con qué signo. Este punto lo veremos al concluir los ejemplos.

5. Ejemplo 2.° Caso de una máquina con N = 12 ranuras y p = 2 pares de polos

El mayor valor de t que divide exactamente a 12 y 2, es $t = 2$. Así, el número de rayos no superpuestos de la estrella es, pues, $N/t = 12/2 = 6$; estando, además, cada 2 superpuestos.

El ángulo existente entre dos rayos contiguos de la estrella es $\beta = 360 \cdot t/N = 360 \cdot 2/12 = 60°$.

Con estos datos podemos representar la estrella de ranuras correspondiente, obteniendo sin dificultad la figura 60.

Como en el ejemplo anterior, procedamos ahora a numerar los rayos teniendo en cuenta que entre dos rayos situados en ranuras contiguas existe un ángulo $\alpha = 360 \cdot p/N = 360 \cdot 2/12 = 60°$.

También ha resultado en este caso que alfa es igual a beta. Así, pues, la numeración de rayos de la estrella es consecutiva, como en el ejemplo anterior.

Al terminar de numerar los seis primeros rayos, vemos que el rayo 7 (figura 60) coincide con el rayo 1. Lo representamos a continuación del mismo, sobre la misma línea.

Lo mismo les sucede a los rayos 8, 9, 10, 11 y 12, que se encuentran respectivamente superpuestos a los rayos 2, 3, 4, 5 y 6. Esto significa, simplemente, que en los conductores situados en las ranuras 1 y 7 se inducen tensiones iguales, tanto en fase como en magnitud. Y análogo fenómeno les sucede a los conductores situados en las ranuras 2 y 8, 3 y 9, etc.

6. Ejemplo 3.° Caso de una máquina con N = 30 ranuras y p = 4 pares de polos

En este caso se tiene que $t = 2$, ya que $t = 3$ no divide exactamente a $p = 4$, ni $t = 4$ divide exactamente a $N = 30$.

El número de rayos no superpuestos de la estrella es: $N/t = 30/2 = 15$, estando, además, cada 2 superpuestos.

El ángulo entre dos rayos contiguos de la estrella es: $\beta = 360 \cdot t/N = 360 \cdot 2/30 = 24°$.

De este modo puede dibujarse la estrella de ranuras tal como representa la figura 61.

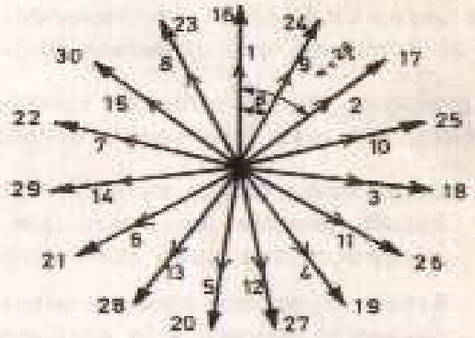


Fig. 61. — Estrella de ranuras para N = 30 y p = 4. Se tiene: t = 2; N/t = 15 rayos; $\beta = 360\ t/N = 24°$; $\alpha = 360\ p/N = 48° = 2\beta$.

La numeración de los rayos se resuelve, como siempre, atendiendo al ángulo alfa existente entre dos rayos que representan las tensiones inducidas en los lados de bobinas de dos ranuras contiguas.
Así: $\alpha = 360 \cdot p/N = 360 \cdot 4/30 = 48°$.

En este caso, como se ve, resulta que alfa = 2 · beta. Por tanto, escogido libremente el rayo 1, determinamos el 2 sin más que buscar el rayo que forme con el rayo 1 un ángulo igual a $2 \cdot \beta$.

Análogamente, el rayo 3 formará un ángulo 2 - β con el rayo 2, el rayo 4 formará un ángulo 2 - β con el rayo 3, etc. (fig. 61).

Al llegar al rayo 16 observamos que coincide con el rayo 1. Como hicimos en el ejemplo anterior, lo dibujaremos a continuación del rayo 1, sobre la misma línea.

Al proseguir la numeración, siempre siguiendo idéntico proceso, encontramos que están superpuestos también los rayos: 2-17, 3-18, 4-19, 5-20, 6-21, 7-22, 8-23, 9-24, 10-25, 11-26, 12-27, 13-28, 14-29 y 15-30.

Al llegar al rayo 30 se ha concluido el proceso, puesto que ya no existen más ranuras en la máquina.

7. Regla para repartir los rayos de la estrella de ranuras entre los tres devanados parciales del arrollamiento trifásico

La segunda etapa del proceso para la determinación sistemática del plan del arrollamiento, una vez ya se ha dibujado la estrella de ranuras y se han numerado sus rayos, consiste en determinar qué rayos de la estrella corresponden a cada devanado parcial o, lo que es lo mismo:

qué lados de bobinas corresponden a cada devanado, y cuál es el sentido de la corriente que atraviesa dichos lados.

El problema se resuelve de modo sencillo, para cualquier tipo de arrollamiento, sin más que seguir ordenadamente el siguiente proceso:

1.° Escogemos en la estrella $N/6$ rayos que formen entre sí el menor ángulo posible: es decir, que estén alineados o, si no bastasen los alineados, que sean contiguos algunos de ellos.

Estos rayos los consideraremos como lados de bobinas del primer devanado parcial, y la corriente pasará por ellos de abajo arriba.

2.° A continuación, buscaremos en la estrella de ranuras otros $N/6$ rayos que formen, respecto a los $N/6$ del apartado anterior, respectivamente, 120 grados, medidos geométricamente sobre la estrella.

Estos rayos los consideraremos como lados de bobinas del segundo devanado parcial, y la corriente pasará por ellos de abajo arriba.

3.° Repetiremos la operación, de modo análogo, para los lados de bobina (sentido de corriente de abajo arriba) del tercer devanado parcial.

4.° Escogeremos ahora otra vez $N/6$ rayos de la estrella que formen 180 grados (si ello es posible), medidos geométricamente sobre la estrella, con los rayos del apartado 1.°

Estos rayos los consideraremos como lados de bobinas del primer devanado parcial, pero, ahora, la corriente los atravesará de arriba abajo.

5.° Repetiremos la operación del apartado anterior, de modo análogo, para determinar los lados de bobinas (sentido de la corriente de arriba abajo) del segundo y tercer devanado parcial.

Cuando hayamos verificado todos los puntos del proceso, se habrá completado la distribución de todos los rayos de la estrella de ranuras entre los tres devanados parciales del arrollamiento trifásico.

Para ver cómo se aplican en la práctica los puntos expuestos, resolveremos a continuación el reparto de los rayos de la estrella en los mismos ejemplos analizados anteriormente.

8. Aplicación al ejemplo 1.°: N = 12, p = 1

La estrella de ranuras correspondiente a este caso se había representado en la figura 59. Para este epígrafe se ha repetido el dibujo en la figura 62.

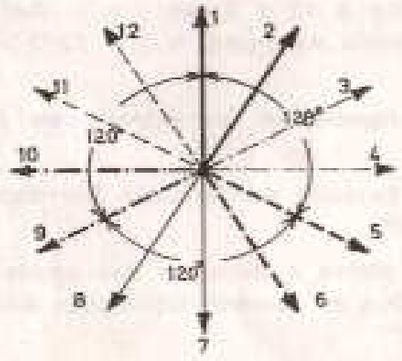


Fig. 62. — Reparto de rayos de la estrella N = 12, p = 1, para m = 3 fases.

Aplicando ordenadamente los diversos puntos de la regla:

1.° Escogeremos en esta estrella $N/6 = 12/6 = 2$ rayos que guarden entre sí el menor desfase posible.

Como aquí no existen rayos alineados, habrán de tomarse contiguos.

Escogemos, pues, por ejemplo, los rayos 1 y 2 (que marcamos con línea de trazo grueso continuo).

Estos rayos los consideramos como lados de bobinas del primer devanado parcial, por los que la corriente pasa de abajo arriba.

2.° Buscamos a continuación otros $N/6 = 2$ rayos que formen respecto a los anteriores, respectivamente, ángulos de 120 grados, medidos geométricamente sobre la estrella.

Como se tiene que $\beta = 30°$, bastará con buscar dos rayos que formen, respectivamente, $4 \cdot \beta = 120°$ con los primeros. El rayo que forma un ángulo igual a $4 \cdot \beta$ con el rayo 1 es el rayo 5; el rayo que forma un ángulo de $4 \cdot \beta$ con el rayo 2 es el rayo 6.

Así, los rayos 5 y 6 (que marcamos con línea interrumpida) los consideramos como lados de bobinas del segundo devanado parcial, por los que la corriente pasa de abajo arriba.

3.° Repetimos la operación, de modo análogo, y determinamos, así, los rayos 9 y 10 (que marcamos con línea de punto y raya), y que los consideramos como lados de bobinas del tercer devanado parcial, por los que la corriente pasa de abajo arriba.

4.° Escogemos ahora otros 2 rayos que forman 180° (aquí es posible) con los rayos 1 y 2 determinados en el apartado 1.°

Son los rayos 7 y 8 (que marcamos con línea fina continua) que consideramos como lados de bobinas del primer devanado parcial, por los que la corriente pasa de arriba abajo.

5.° Repetimos la operación anterior, análogamente, y determinamos así los rayos 11 y 12 (línea fina interrumpida) del segundo devanado parcial (corriente de arriba abajo), y los rayos 3 y 4 (línea fina de punto y raya) del tercer devanado parcial (corriente de arriba abajo).

De este modo hemos distribuido todos los rayos que componían la estrella de ranuras entre los tres devanados parciales del arrollamiento.

La siguiente etapa, que conduce a la determinación del plan del arrollamiento, la veremos en el capítulo siguiente. Continuamos ahora con los ejemplos.

9. Aplicación al ejemplo 2.°: N = 12, p = 2

La estrella de ranuras correspondiente a este caso se había representado en la figura 60. Para este epígrafe hemos repetido el dibujo en la figura 63. Aplicando ordenadamente los puntos de la regla:

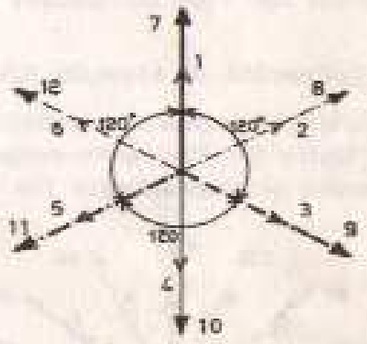


Fig. 63 — Reparto de rayos de la estrella $N = 12$, $p = 2$, para $m = 3$ fases.

1.° Escogemos $N/6 = 12/6 = 2$ rayos de la estrella que guarden entre sí el menor desfase posible.

Como aquí hay dos rayos alineados, escogemos un par cualquiera de ellos, por ejemplo, los 1 y 7 (que marcamos con línea gruesa de trazo continuo).

Estos rayos los consideramos como lados de bobinas de primer devanado parcial, por los que la corriente pasa de abajo arriba.

2.° Los rayos 3 y 9 (línea gruesa de trazo interrumpido) forman un ángulo de $2 \cdot \beta = 120°$ con los rayos 1 y 7.
Por tanto, los rayos 3 y 9 los consideramos como lados de bobinas del segundo devanado parcial, por los que pasa la corriente de abajo arriba.

3.° Análogamente, los rayos 5 y 11 (línea gruesa de punto y raya), que forman un ángulo de $2 \cdot \beta = 120°$ con los 3 y 9, respectivamente, son los correspondientes a los lados de las bobinas del tercer devanado parcial, por los que la corriente pasa de abajo arriba.

4.° Escogemos otros 2 rayos que forman 180° (también es aquí posible) con los 1 y 7 correspondientes al primer devanado parcial.

Son los rayos 4 y 10 (línea fina de trazo continuo) que consideramos como lados de bobinas del primer devanado parcial (corriente de arriba abajo).

5.° Repetimos la operación anterior, análogamente, y determinamos así los rayos 6 y 12 (línea fina interrumpida) del segundo devanado parcial (corriente de arriba abajo), y los rayos 2 y 8 (línea fina de punto y raya) del tercer devanado parcial (corriente de arriba abajo).

Con ello, hemos concluido el reparto de los rayos de la estrella de ranuras entre los tres devanados parciales del arrollamiento trifásico.

10. Aplicación al ejemplo 3.°: N = 30, p = 4

La estrella de ranuras correspondiente a este caso se había representado en la figura 61. Para este epígrafe se ha repetido el dibujo en la figura 64. Aplicando ordenadamente los diversos puntos de la regla:

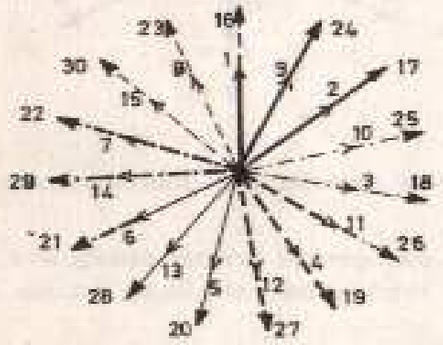


Fig. 64. — Reparto de rayos de la estrella N = 30, p = 4, para m = 3 fases.

1.° Escogemos $N/6 = 30/6 = 5$ rayos que guarden entre sí el menor desfase posible.

Como cada 2 rayos están superpuestos, habrá que tomar dos pares de rayos superpuestos, y otro rayo contiguo a los anteriores.

Por ejemplo, elegimos los rayos 1, 9-24 y 2-17. Estos rayos (línea gruesa de trazo continuo) los consideramos como lados de bobinas del primer devanado parcial (corriente de abajo arriba).

2.° Tomamos otros 5 rayos que guarden entre sí el menor desfase posible, y formen con los anteriores ángulos respectivos de 120°.

Son los 11, 4-19 y 12-27 (línea gruesa de trazo interrumpido) que consideramos correspondientes al segundo devanado parcial (corriente de abajo arriba).

3.° Análogamente, los rayos 21, 14-29 y 7-22 (línea gruesa de punto y raya) son los correspondientes al tercer devanado parcial (corriente de abajo arriba).

4.° Escogemos otros 5 rayos que (no siendo posible que formen 180°) forman ángulos *lo más próximos posible a 180°* con los rayos 1, 9-24 y 2-17, respectivamente, del primer devanado parcial.

Fácilmente se deduce que no pueden ser otros que los 5-20, 13-28 y 6 (línea de trazo fino continuo), que consideramos como los correspondientes al primer devanado parcial (corriente de arriba abajo).

5.° Análogamente, los rayos 15-30, 8-23 y 16 (línea fina de trazo interrumpido) son los del segundo devanado parcial (corriente de arriba abajo), y los rayos 26, 10-25 y 3-18 (línea fina de punto y raya) son los del tercer devanado parcial (corriente de arriba abajo).

Con ello, hemos concluido el reparto de los rayos de la estrella de ranuras entre los tres devanados parciales del arrollamiento trifásico.

CAPITULO IX

PASO DE LA ESTRELLA DE RANURAS AL PLAN DEL ARROLLAMIENTO

1. Introducción

En el capítulo anterior hemos visto cómo se construye la estrella de ranuras para una máquina de la que conocemos su número total *N* de ranuras y su número *p* de pares de polos. Asimismo, examinamos cómo, dibujada la estrella, se determinaba qué rayos de la misma correspondían a lados de bobinas de los arrollamientos parciales, y en qué sentido circulaba la corriente por dichos lados.

En este capítulo determinaremos, basándonos en lo antedicho, el esquema del plan del arrollamiento, cuya importancia ya se ha destacado.

El procedimiento a seguir, muy sencillo y fácil de aprender, consta de dos etapas:

1.ª Apoyándonos exclusivamente en la estrella de ranuras, trasladaremos los rayos (lados de bobinas) situados en ella, con el correspondiente sentido de la corriente, a las ranuras que correspondan, dibujando éstas consecutivamente alineadas.
Hasta este punto el proceso *es válido para todo tipo de arrollamiento*, lo mismo si es entero que fraccionario, si es a una o a dos capas, etc.

2.ª Prescindiendo de cuál sea su forma exacta definitiva, dibujaremos las cabezas de las bobinas de cada devanado parcial.

Para ello es preciso haber decidido previamente *qué tipo de arrollamiento se desea ejecutar*, o viene obligado.

Para aclarar bien todo el desarrollo, lo aplicaremos a los tres mismos ejemplos considerados en el capítulo anterior, estudiando para cada uno de ellos todas las posibilidades de elección del tipo del arrollamiento.

Para no complicar excesivamente este capítulo, consideraremos que todas las uniones entre bobinas y grupos de bobinas se desea realizarlas en serie, dejando para otro lugar la posibilidad de conexiones en paralelo.

2. Ejemplo 1.º: N = 12, p = 1

La estrella de ranuras correspondiente a este caso, con el reparto de rayos entre los tres devanados parciales, se había representado en la figura 62 del capítulo anterior.

Representamos ahora (fig. 65) las $N = 12$ ranuras por puntos alineados que numeramos consecutivamente: 1, 2, 3, ..., 12.

De la estrella de ranuras sabemos qué lados de bobinas de cada devanado corresponden a cada ranura, y los representamos encima de las ranuras (fig. 65), con su correspondiente sentido de la corriente.

Fig. 65. — Los rayos de la estrella (N = 12, p = 1, m = 3) se sitúan sobre las correspondientes ranuras alineadas, con sus sentidos de corriente.

Así, los lados de bobinas del primer devanado parcial (rayos 1 y 2) se encuentran situados sobre las ranuras 1 y 2, respectivamente. Se han dibujado de línea gruesa continua y se ha señalado el sentido de la corriente (de abajo arriba). Todo ello se ha tomado sencillamente de la correspondiente estrella de ranuras.

Análogamente, los lados de bobinas del segundo devanado parcial (rayos 5 y 6) se han situado sobre las ranuras 5 y 6, respectivamente. Se han dibujado de línea fina, y se ha señalado el sentido de la corriente (de abajo arriba).

Lo mismo para los lados de bobinas del tercer devanado parcial (rayos 9 y 10), situados sobre las ranuras 9 y 10, respectivamente. Se han dibujado de línea de trazos, y se ha señalado el sentido de la corriente (de abajo arriba).

Ahora se hace lo mismo para los lados de bobinas de los tres devanados parciales cuyo sentido de la corriente es de arriba abajo, siempre tomando estos datos de la estrella de ranuras.

Así se tiene:

Lados 7 y 8 (rayos 7 y 8 de la estrella), pertenecientes al primer devanado parcial, dibujados de línea gruesa, corriente de arriba abajo.

Lados 11 y 12 (rayos 11 y 12 de la estrella), pertenecientes al segundo devanado parcial, dibujados de línea fina, corriente de arriba abajo.

Lados 3 y 4 (rayos 3 y 4 de la estrella), pertenecientes al tercer devanado parcial, dibujados de línea de trazos, corriente de arriba abajo.

Cuando se han situado sobre sus correspondientes ranuras todos los lados de las bobinas (o sea, todos los rayos de la estrella), se ha concluido la primera etapa del proceso.

Repetimos que esta primera etapa es válida para cualquier clase de arrollamiento, dependiendo, *exclusivamente*, del número *N* de ranuras, del de polos *p* (y el de fases *m*) de la máquina.

Después, se pasará a dibujar las cabezas de las bobinas, uniendo adecuadamente los correspondientes lados de bobinas, resultando necesario ya escoger previamente el tipo de arrollamiento que se desea, o es posible (ver cap. X) ejecutar.

Al igual que haremos para con los restantes ejemplos, resolveremos este primer caso según las posibilidades que ofrezca.

3. Caso 1a: Arrollamiento a una capa, con bobinas de paso constante

El único cuidado que hay que tener al dibujar las cabezas de bobinas (aparte de seguir el tipo del arrollamiento propuesto), es que unan lados correspondientes. Para ello hay que fijarse que al recorrer una bobina, o las varias bobinas de un grupo, se pase siempre por los lados en el mismo sentido que indican las flechas, o sea, en el sentido de la corriente. Sobre la marcha se comprenderá fácilmente. Atendamos en primer lugar al primer devanado parcial (fig. 66 *a*):

Escogemos como principio *U* del mismo el lado de bobina situado en la ranura 1. Recorriendo este lado de bobina según indica la flecha, formaremos la cabeza de bobina al pasar a uno de los lados situados sobre las ranuras 7 u 8.

Si uniésemos, mediante una cabeza de bobina, el lado 1 con el 8, el paso de la bobina sería $y = 1 : 8$, o sea, de siete ranuras.

Al unir, después, el lado 2 con el 7 (que son los lados restantes del primer devanado parcial), esta última bobina tendría un paso de $y = 1 : 6$, o sea, de cinco ranuras.

El arrollamiento así ejecutado no tendría, pues, bobinas de paso constante, al revés de lo que nos hemos propuesto.

Por ello, es necesario operar como sigue:

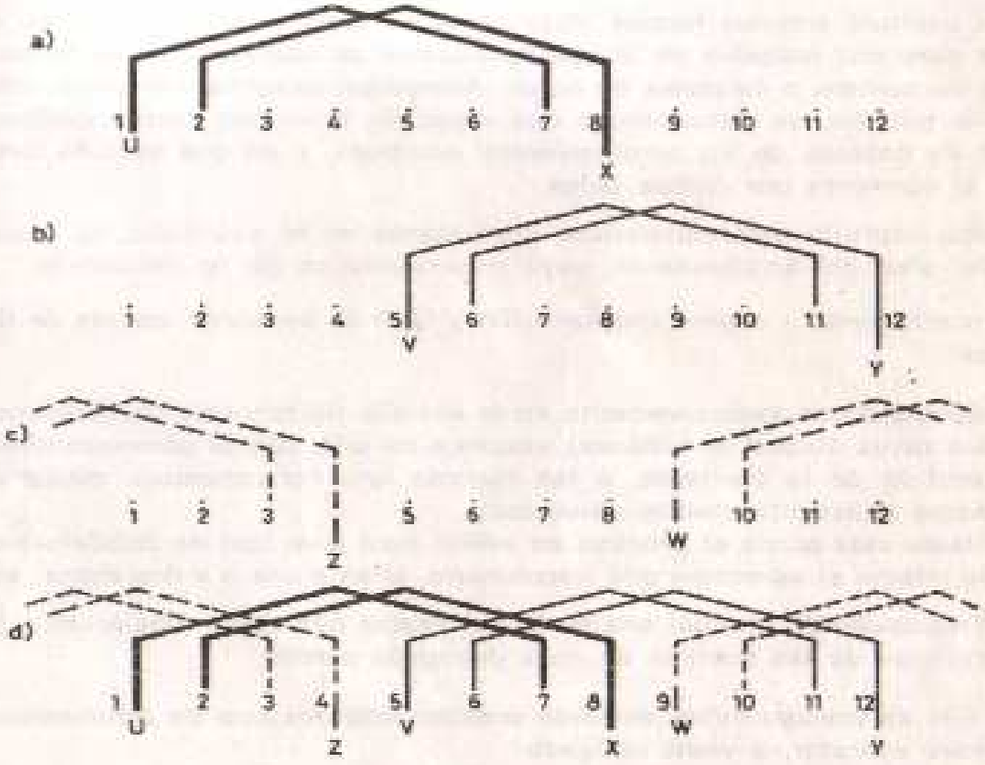


Fig. 66. — N = 12, 2p = 2, m = 3. Arrollamiento a una capa, con bobinas de paso constante. a) Devanado de la primera fase U-X. b) Devanado de la segunda fase V-Y. c) Devanado de la tercera fase W-Z. d) Plan del arrollamiento trifásico, obtenido por superposición de los tres devanados parciales.

Partiendo del principio *U* (fig. 66 *a*) pasamos por el lado 1 y formamos la cabeza de bobina al entrar por el lado de bobina 7 (paso $y = 1 : 7$). Saliendo del lado 7 volveríamos a entrar en la ranura 1 y recorreríamos la bobina (1-7) tantas veces (vueltas) como indicara el número de conductores que debe tener cada ranura.

Concluida la bobina (1-7), y sin interrupción del hilo, pasamos a la ranura 2, recorremos al lado 2 y formamos la cabeza de bobina al entrar por el lado de bobina 8 (paso $y = 1 : 7$), ciclo que se recorrería igual número de veces (vueltas) que para la primera bobina del grupo.

Al concluir la bobina (2-8), y al no existir más lados de bobina del primer devanado parcial, se ha terminado dicho devanado. Así, el final *X* del devanado está bajo la ranura 8.

Como se ha visto, las dos bobinas tienen el mismo paso $y = 1 : 7$.

Para el segundo devanado parcial (fig. 66 *b*), desarrollamos un proceso análogo:

El principio *V* se toma de la estrella de ranuras pues, ya que el principio *U* se ha tomado en el lado (rayo) 1, basta buscar el primer rayo positivo del segundo devanado (corriente de abajo arriba). Resulta ser el rayo 5. Partiendo de *V* recorremos el lado 5, formando la cabeza de la bobina al pasar al lado 11. Salimos de 11 y, después de recorrer el ciclo el número de veces (vueltas) correspondiente, pasamos a la ranura 6. Recorremos el lado 6, formando la cabeza de bobina al pasar al lado 12, bajo cuya ranura se encuentra el final *Y* de este segundo devanado.

Se comprueba que el paso de las dos bobinas del grupo es, también, $y = 1 : 7$.

El principio del tercer devanado parcial se obtiene de la estrella. Es el rayo 9, primero de los del tercer devanado (corriente de abajo arriba). El recorrido para formar las cabezas de bobinas es el siguiente (fig. 66 *c*): Principio *W* — lado 9 — cabeza de bobina — lado 3 — ranura 10 — lado 10 — cabeza de bobina — lado 4 — ranura 4 — final *Z*. Se comprueba el paso, $y = 1 : 7$.

El plan conjunto del arrollamiento se obtiene (fig. 66 *d*) al superponer los tres devanados parciales.

Para la ficha del taller de bobinado, a la vista del esquema del plan del arrollamiento, se toma nota del número de grupos de cada fase, así como del número de bobinas por grupo, y del paso de las bobinas.

Conviene también anotar la situación de los terminales. En resumen, escribiríamos:
Por fase: 1 grupo de 2 bobinas. Paso: 1 : 7

Terminales: $U = 1$; $V = 5$; $W = 9$.
$X = 8$; $Y = 12$; $Z = 4$.

Obsérvese que el número de bobinas de cada grupo coincide con el valor *q*, o sea, con el número de ranuras por polo y fase $q = N/2p \cdot m = 12/6 = 2$.

4. Caso 1b: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos

La primera etapa del proceso es siempre la misma. A través de la estrella de ranuras se obtiene la figura 65.

Como antes, atendiendo al primer devanado parcial (fig. 67):

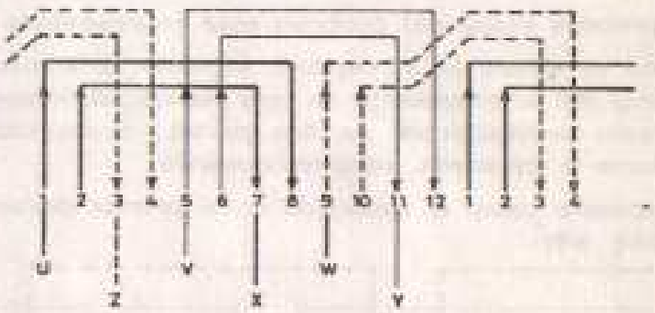


Fig. 67. — N = 12, 2p = 2, m = 3. Plan del arrollamiento con cabezas de bobinas en dos planos.

Escogemos como principio *U* del devanado el lado de bobina 1. Partiendo de *U*, recorremos el lado 1 y formamos la cabeza de bobina al pasar al lado 8 (en vez del lado 7, como en el caso 1a). Salimos de 8 y pasamos a la ranura 2, recorremos el lado 2 y formamos la cabeza de bobina al pasar al lado 7. Debajo de la ranura 7 se encuentra el final *X* de este primer devanado parcial.

Observamos que el paso de este grupo de bobinas es $y = 1 : 6 : 8$.

Al repetir un proceso análogo para el segundo devanado parcial, hacemos el recorrido siguiente:

Principio *V* — lado 5 — cabeza de bobina — lado 12 — ranura 6 — lado 6 — cabeza de bobina — lado 11 — ranura 11 — final *Y*.

Observamos que el paso del devanado de este grupo de bobinas es $y = 1 : 6 : 8$.

Para el tercer devanado parcial, el recorrido es el siguiente:

Principio *W* — lado 9 — cabeza de bobina — lado 4 — ranura 10 — lado 10 — cabeza de bobina — lado 3 — ranura 3 — final *Z*.

En la figura 67 se han dispuesto, al final de la ranura 12, las ranuras 1, 2, 3 y 4 nuevamente, con el fin de que se vea completo el último grupo de bobinas. El paso es, también, $y = 1 : 6 : 8$.

Para el caso que nos ha ocupado, escribiremos la siguiente ficha de taller:

Por fase: 1 grupo de dos bobinas. Paso: 1 : 6 : 8

Terminales: $U = 1$; $V = 5$; $W = 9$.
$X = 7$; $Y = 11$; $Z = 3$.

Observemos que, también en este caso, el número de bobinas de cada grupo coincide con el valor de $q = N/2p \cdot m = 12/6 = 2$.

5. Caso 1c: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos

La primera etapa del proceso está representada en la figura 65.

Como ya vimos en el capítulo séptimo, el arrollamiento en tres planos se genera del arrollamiento en dos planos, dividiendo cada grupo de bobinas de este arrollamiento en dos partes, cuyas cabezas se dirigen hacia la derecha e izquierda, respectivamente.

En nuestro caso, el recorrido en el primer devanado parcial es el siguiente (fig. 68):

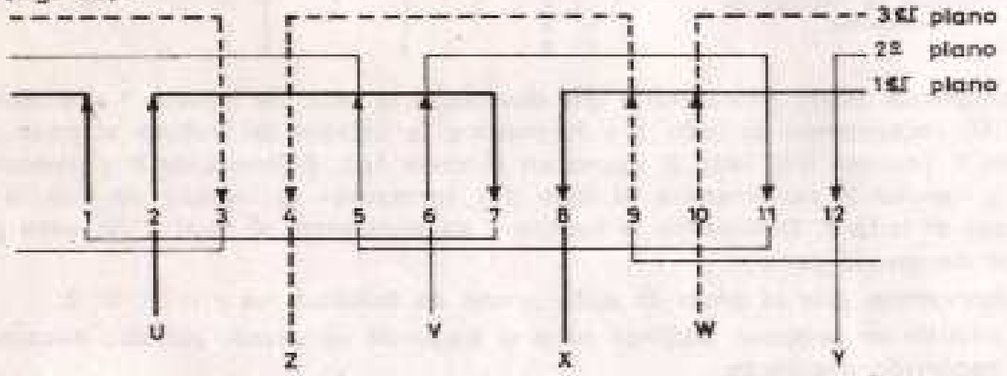


Fig. 68. — N = 12, 2p = 2, m = 3. Plan del arrollamiento con cabezas de bobinas en tres planos. Compárese con la figura 67 para ver la generación de grupos.

Principio U — lado 2 — cabeza de bobina (hacia la derecha) — lado 7 — final de bobina. Este final se conecta al principio de la otra bobina del devanado cuyo recorrido es:

Principio de bobina — lado 1 — cabeza de bobina (hacia la izquierda) — lado 8 — final X.

Análogamente, los recorridos de los devanados restantes son:
Segundo devanado parcial:

Principio V — lado 6 — cabeza de bobina (hacia la derecha) — lado 11 — final de bobina — conexión — principio de bobina — lado 5 — cabeza de bobina (hacia la izquierda) — lado 12 — final Y.

Tercer devanado parcial:

Principio W — lado 10 — cabeza de bobina (hacia la derecha) — lado 3 — final de bobina — conexión — principio de bobina — lado 9 — cabeza de bobina (hacia la izquierda) — lado 4 — final Z.

Comparando las figuras 67 y 68, se observa cómo de cada grupo de dos bobinas, del arrollamiento en dos planos, se generan dos grupos de una bobina en el arrollamiento en tres planos.

Para la ficha del taller de bobinado anotaremos:

Por fase: 2 grupos de 1 bobina (o, sencillamente, 2 bobinas simples). Paso: $y = 1 : 6$ (en este caso particular se obtienen bobinas de paso constante; no siempre sucede así).

Terminales: $U = 2$; $V = 6$; $W = 10$.
$X = 8$; $Y = 12$; $Z = 4$.

Las conexiones, en serie, se han verificado en el esquema.

Observemos que, ahora, el número de bobinas por grupo (= 1) es precisamente igual a la mitad del valor de q (= 2).

6. Caso 1d: Arrollamiento a dos capas

Solamente nos queda por resolver, para el primer ejemplo, este último tipo de arrollamiento.

Según vimos, en los arrollamientos a dos capas existen dos lados de bobinas en cada ranura. A pesar de ello, se opera en principio como si se tratase de un arrollamiento a una capa, construyendo como siempre la estrella de ranuras, y repartiendo los rayos de la misma entre los tres devanados parciales (ver cap. VIII).

La primera etapa es, pues, la misma que hasta ahora, de modo que obtenemos la figura 69 semejante a la figura 65, con la única diferencia que los lados de bobinas se han desplazado algo hacia la izquierda (capa inferior) para dejar lugar a los lados de bobina de la capa superior.

La ventaja de los arrollamientos a dos capas, sobre los arrollamientos a una sola capa, es que los primeros pueden ejecutarse, prácticamente, con el paso del devanado que se desee, mientras que en los segundos el paso

del devanado viene obligado. La desventaja principal es que exige devanar e insertar doble número de bobinas que los arrollamientos a una capa.

Fig. 69. — Los rayos de la estrella (fig. 62) son ahora los lados de bobinas de la capa inferior.

Puesto que es posible escoger el paso del devanado, construiremos, en primer lugar, un arrollamiento a dos capas con paso diametral de $N/2p = 12/2 = 6$ ranuras, o sea, con $y = 1 : 7$.

6a. Arrollamiento a dos capas, con paso diametral y = 1 : 7

Tomamos como principio *U* del primer devanado parcial (fig. 70 *a*) el lado 1 de bobina (capa inferior). Así, entramos por el lado 1 y, según exige el paso del devanado propuesto, formamos la cabeza de bobina al entrar en la ranura 7, constituyendo así el lado 7 (capa superior).

De la ranura 7 pasamos a la 2 (capa inferior), recorremos el lado 2 y formamos la cabeza de bobina, teniendo en cuenta el paso al entrar en la ranura 8, constituyendo así el lado 8 (capa superior).

Saliendo de la ranura 8, hay que buscar aquella ranura cuya distancia al lado 8 (capa inferior) sea precisamente de 6 ranuras (o sea, paso $y = 1 : 7$).

Dicha ranura es la 2, comienzo del segundo grupo del primer devanado. Se entra, pues, por la ranura 2, constituyendo el lado 2 (capa superior) y se forma la cabeza de bobina (hacia la izquierda) al pasar al lado 8 (capa inferior). De la ranura 8 se pasa a la 1, constituyendo el lado 1 (capa superior) y formando la cabeza de bobina (hacia la izquierda) al pasar al lado 7 (capa inferior). Bajo la ranura 7 se encuentra el final *X* del primer devanado parcial.

En la figura 70 *a* se puede seguir el proceso explicado que cuesta más de decir que de entender.

El recorrido para el segundo devanado parcial es el siguiente (fig. 70 *b*):

Principio *V* — lado 5 (capa inferior) — cabeza de bobina (hacia la derecha) — lado 11 (capa superior) — ranura 6 — lado 6 (capa inferior) — cabeza de bobina (hacia la derecha) — lado 12 (capa superior) — final del primer grupo de bobinas.

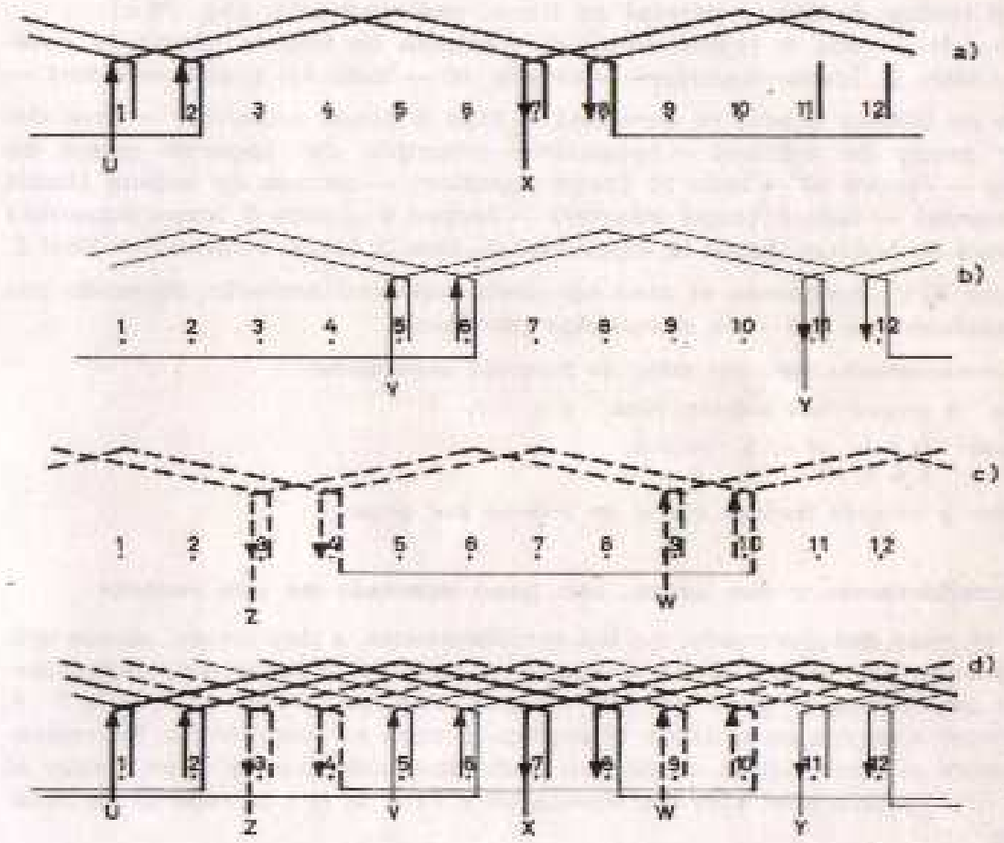


Fig. 70 — N = 12, 2p = 2, m = 3. Arrollamiento a dos capas, con paso diametral. a) Devanado de la primera fase U-X. b) Devanado de la segunda fase V-Y. c) Devanado de la tercera fase W-Z. d) Plan del arrollamiento trifásico, obtenido por superposición de los tres devanados parciales.

Dicho final se conectará, al concluir la colocación de todos los grupos de bobinas del arrollamiento, con el principio del segundo grupo de bobinas del segundo devanado parcial (en el caso de conexión en serie).

Siguiendo, pues, el recorrido:
Principio del segundo grupo de bobinas — ranura 6 — lado 6 (capa superior) — cabeza de bobina (hacia la izquierda) — lado 12 (capa inferior) — ranura 5 — lado 5 (capa superior) — cabeza de bobina (hacia la izquierda) — lado 11 (capa inferior) — final *Y*.

Para el tercer devanado parcial se tiene, análogamente (fig. 70 *c*):
Principio *W* — lado 9 (capa inferior) — cabeza de bobina (hacia la derecha) — lado 3 (capa superior) — ranura 10 — lado 10 (capa inferior) — cabeza de bobina (hacia la derecha) — lado 4 (capa superior) — final del primer grupo de bobinas — conexión — principio del segundo grupo de bobinas — ranura 10 — lado 10 (capa superior) — cabeza de bobina (hacia la izquierda) — lado 4 (capa inferior) — ranura 9 — lado 9 (capa superior) — cabeza de bobina (hacia la izquierda) — lado 3 (capa inferior) — final *Z*.

La figura 70 *d* representa el plan completo del arrollamiento, obtenido por superposición de los tres devanados parciales.

En la correspondiente ficha del taller de bobinado anotaremos:

Por fase: 2 grupos de 2 bobinas. Paso: $y = 1 : 7$.

Terminales: $U = 1$; $V = 5$; $W = 9$.
$X = 7$; $Y = 11$; $Z = 3$.

El número *q* coincide también con el de bobinas por grupo.

6b. Arrollamiento a dos capas, con paso acortado en dos ranuras

Como el paso del devanado, en los arrollamientos a dos capas, puede elegirse a voluntad, vamos ahora a dibujar el plan del arrollamiento admitiendo que acortamos el paso en dos ranuras. Así, se tendrá aquí, $y = 1 : 5$. El proceso a seguir es análogo al explicado para el epígrafe 6a. No repetimos ahora el recorrido a seguir en cada devanado parcial para evitar al lector una lectura que, con las figuras 69 y 71 *a*, *b*, *c* y *d*, resulta ya innecesaria.

La anotación para la ficha del taller de bobinado sería la misma que la del epígrafe anterior, exceptuando que el paso es, aquí, $y = 1 : 5$.

7. Ejemplo 2.º: N = 12, p = 2

La estrella de ranuras correspondiente a este caso, con el reparto de rayos entre los tres devanados parciales, se había representado en la figura 63 del capítulo anterior.

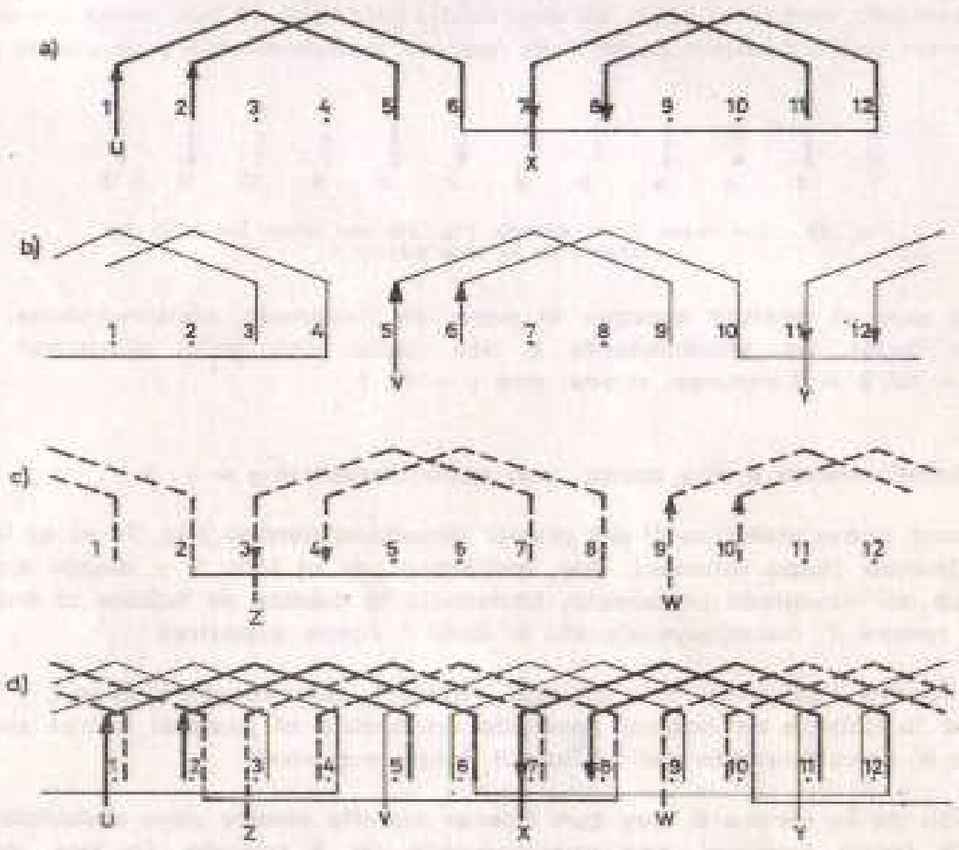


Fig. 71. — N = 12, 2p = 2, m = 3. Arrollamiento a dos capas, con paso acortado en 2 ranuras. a) Fase U-X. b) Fase V-Y. c) Fase W-Z. d) Plan del arrollamiento trifásico, obtenido por superposición de los tres devanados parciales.

De modo análogo al desarrollado en el epígrafe 2, trasladamos los datos de la estrella a las 12 ranuras alineadas y consecutivamente numeradas. Obtenemos de esta manera la figura 72, que será válida para todos los tipos de arrollamiento que se estudiarán a continuación.

Fig. 72. — Los rayos de la estrella (N = 12, p = 2, m = 3) se sitúan sobre las correspondientes ranuras alineadas, con sus sentidos de corriente.

8. Caso 2a: Arrollamiento a una capa, con bobinas de paso constante

Tomamos como principio *U*, del primer devanado parcial (fig. 73), el lado 1 de bobina. El paso del devanado resulte aquí forzado, ya que no existe otra posibilidad que, saliendo del lado 1, formar la cabeza de bobina al pasar al lado 4.

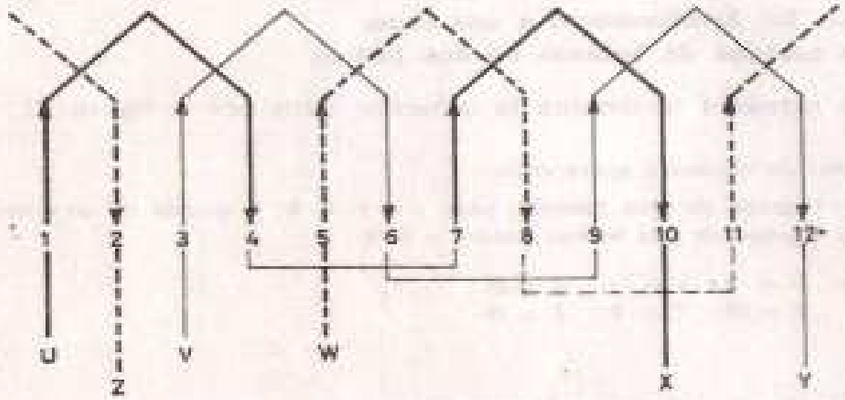


Fig. 73. — N = 12, 2p = 4, m = 3. Plan del arrollamiento a una capa, con bobinas de paso constante.

El final de la primera bobina, del primer devanado parcial, se conecta con el principio de la segunda bobina, que es la que tiene por lados los 7 y 10. Debajo de la ranura 10 se encuentra el final *X*.

El principio *V*, del segundo devanado parcial, se obtiene de la propia estrella de ranuras al determinar el primer rayo positivo de la segunda fase. Resulta ser el rayo 3, de modo que el recorrido es el siguiente:

Principio *V* — lado 3 — cabeza de bobina — lado 6 — final de bobina — conexión — principio de bobina — lado 9 — cabeza de bobina — lado 12 — final *Y*.

Para el tercer devanado parcial, análogamente:

Principio *W* — lado 5 — cabeza de bobina — lado 8 — final de bobina — conexión — principio de bobina — lado 11 — cabeza de bobina — lado 2 — final *Z*.

Para la ficha del taller de bobinado anotaremos:

Por fase: 2 grupos de 1 bobina (o sencillamente, 2 bobinas simples). Paso: $y = 1:4$ (que es el diametral).

Terminales: $U = 1$; $V = 3$; $W = 5$.
$X = 10$; $Y = 12$; $Z = 2$.

9. Caso 2b: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos

El plan del arrollamiento es tan simple, en este caso, que el lector lo razonará fácilmente a la vista del esquema mismo (fig. 74).

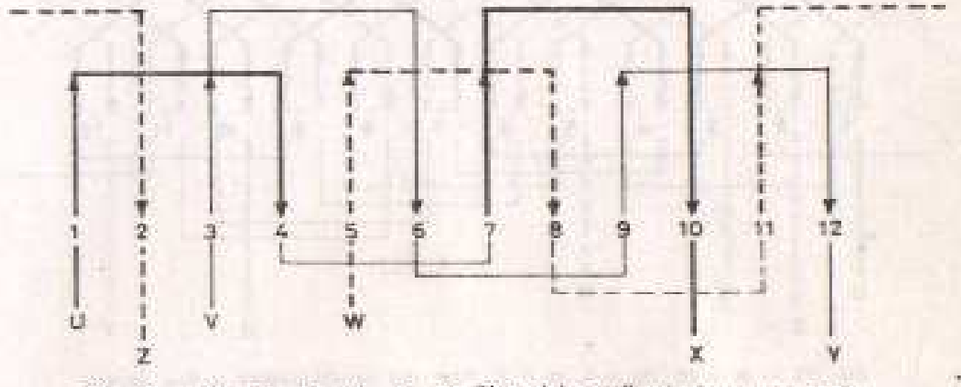


Fig. 74. — N = 12, 2p = 4, m = 3. Plan del arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos.

Para la ficha del taller de bobinado, escribiremos:

Por fase: 2 grupos de 1 bobina (o sencillamente, 2 bobinas simples). Paso: $y = 1:4$ (que es el diametral).

Terminales: $U = 1$; $V = 3$; $W = 5$.
$X = 10$; $Y = 12$; $Z = 2$.

Se observará que este caso 2b solamente se diferencia del 2a en la disposición y forma de las cabezas de bobinas. En general aparecen, además, otras diferencias que no se aprecian en este caso particular.

10. Caso 2c: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos

De la generación de estos arrollamientos como provenientes de los arrollamientos con cabezas en dos planos, se deduce que, puesto que en el caso 2b solamente aparecen bobinas simples, no existe posibilidad alguna de subdividirlas en partes.

Así, pues, no hay posibilidad de ejecutar este arrollamiento con cabezas en tres planos.

11. Caso 2d: Arrollamiento a dos capas

En este caso, tenemos que decidir previamente cuál es el paso del devanado que nos interesa. Dibujaremos aquí el plan del arrollamiento a dos capas con paso del devanado acortado en una ranura, o sea, con $y = 1 : 3$. Se obtiene la representación de la figura 75, cuya deducción dejamos al lector.

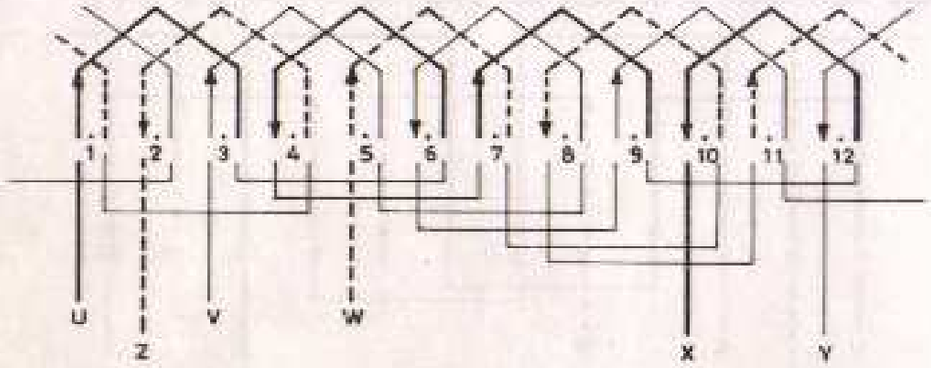


Fig. 75. — N = 12, 2p = 4, m = 3. Plan del arrollamiento a dos capas, con paso acortado en una ranura.

Para la ficha del taller de bobinado, anotaremos:

Por fase: 4 grupos de 1 bobina (o, sencillamente, 4 bobinas simples). Paso: $y = 1 : 3$ (acortado).

Terminales: $U = 1$; $V = 3$; $W = 5$.
$X = 10$; $Y = 12$; $Z = 2$.

Las conexiones se han verificado en la figura (en serie).

12. Ejemplo 3.°: N = 30, p = 4

La estrella de ranuras correspondiente a este caso, con el reparto de rayos entre los tres devanados parciales, se había representado en la figura 64 del capítulo anterior.

Fig. 76. — Los rayos de la estrella (N = 30, p = 4, m = 3) se sitúan sobre las correspondientes ranuras alineadas, con sus sentidos de corriente.

De modo análogo al desarrollado en los epígrafes 2 y 7, trasladamos los datos de la estrella a las 30 ranuras alineadas y consecutivamente numeradas. Obtenemos de esta manera la figura 76.

Esta primera etapa será válida para todos los tipos de arrollamiento que se estudiarán a continuación.

13. Caso 3a: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos

El lector razonará fácilmente la solución, dada por la figura 77.

Para el taller de bobinado, anotaremos:

Por fase: 1 grupo de dos bobinas, paso $y = 1 : 4$ 6; 2 grupos de una bobina, paso $y = 1 : 5$, y 1 grupo de una bobina, paso $y = 1 : 4$.

Terminales: $U = 1$; $V = 11$; $W = 21$.
$X = 28$; $Y = 8$; $Z = 18$.

14. Caso 3b: Arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos

El lector razonará fácilmente la solución, dada por la figura 78.

Para el taller de bobinado, anotaremos:

Por fase: 2 grupos de una bobina, paso $y = 1 : 5$; 3 grupos de una bobina, paso $y = 1 : 4$.

Terminales: $U = 2$; $V = 12$; $W = 22$.
$X = 28$; $Y = 8$; $Z = 18$.

15. Caso 3c: Arrollamiento a dos capas, con paso acortado 1 : 4

El lector razonará fácilmente la solución, dada por la figura 79.

Para el taller de bobinado, anotaremos:

Por fase: 2 grupos de dos bobinas; 6 grupos de 1 bobina. Paso: $y = 1 : 4$.

Terminales: $U = 1$; $V = 11$; $W = 21$.
$X = 28$; $Y = 8$; $Z = 18$.

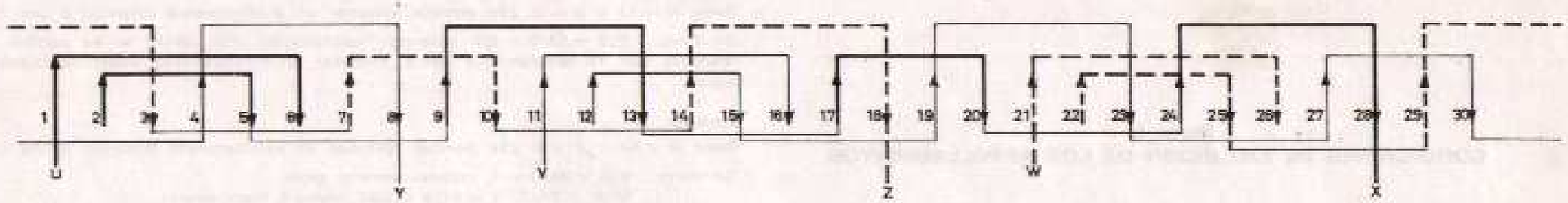


Fig. 77. — N = 30, 2p = 6, m = 3. Plan del arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos.

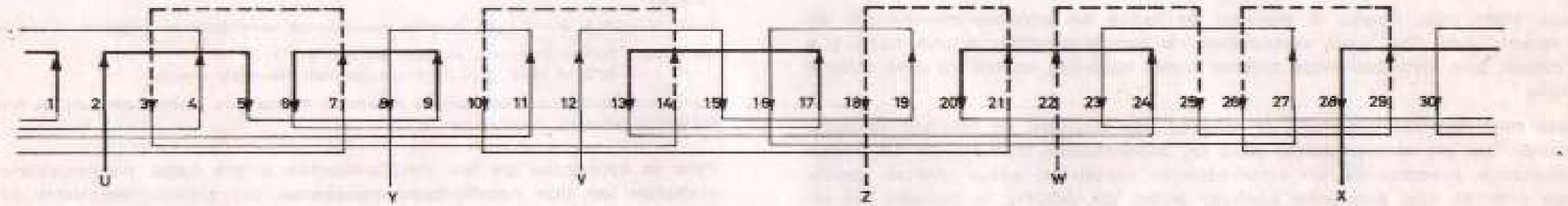


Fig. 78. — N = 30, 2p = 6, m = 3. Plan del arrollamiento a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos.

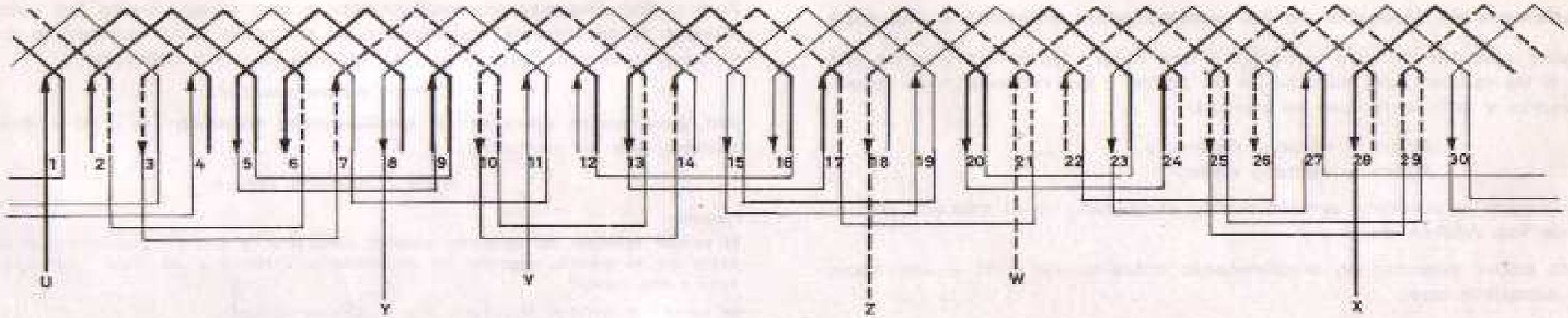


Fig. 79. — N = 30, 2p = 6, m = 3. Plan del arrollamiento a dos capas, con paso acortado y = 1 : 4.

CAPITULO X

Parte I:
CONDICIONES DE EJECUCION DE LOS ARROLLAMIENTOS

1. Introducción

Hemos visto que, según el número de lados de bobinas contenidos en una ranura, hay dos tipos esenciales de arrollamientos: a una capa y a dos capas. Los arrollamientos mixtos serán tratados aparte en este mismo capítulo.

En una máquina eléctrica con N ranuras, no siempre es posible ejecutar cualquier tipo de arrollamiento para un determinado número $2p$ de polos. La ejecución práctica de un arrollamiento simétrico exige ciertas condiciones previas que conviene analizar antes de dibujar la estrella de ranuras. Dichas condiciones son las que veremos en la primera parte de este capítulo.

2. Condiciones de ejecución de los arrollamientos trifásicos a una capa

Para poder ejecutar un arrollamiento a una capa, dados los valores del número N de ranuras, del número $2p$ de polos, y del número m de fases, es necesario y suficiente que se cumpla:

$N/2m$ = número entero, y
N/tm = número entero,

donde t, según la notación anteriormente empleada, es el máximo común divisor de los valores de N y p.

Así, para poder ejecutar un arrollamiento trifásico ($m = 3$) a una capa, deberá cumplirse que:

$N/6$ sea un número entero, y
$N/3t$ sea, también, un número entero.

Ejemplo:

Sean $N = 15$ y $p = 2$. ¿Es posible ejecutar un arrollamiento trifásico a una capa?

Se tiene: $N/6 = 15/6 = 2{,}5$ (número fraccionario). Por tanto, no es posible, para una máquina con 15 ranuras y 4 polos, ejecutar un arrollamiento simétrico trifásico a una capa.

Ejemplo:

Sean $N = 24$ y $p = 3$. ¿Es posible ejecutar un arrollamiento trifásico a una capa?

Se tiene: $N/6 = 24/6 = 4$, número entero; pero,
$N/3t = 24/3 \cdot 3 = 24/9 = 2{,}66$, número fraccionario.

Por tanto, no es posible, para una máquina con 24 ranuras y 6 polos, ejecutar un arrollamiento simétrico trifásico a una capa.

Ejemplo:

Sean $N = 24$ y $p = 2$. ¿Es posible ejecutar un arrollamiento trifásico a una capa?

Se tiene: $N/6 = 24/6 = 4$, número entero; y,
$N/3t = 24/3 \cdot 2 = 24/6 = 4$, también número entero.

Por tanto, en una máquina con 24 ranuras y 4 polos, es posible ejecutar un arrollamiento simétrico trifásico a una capa.

Para la ejecución de los arrollamientos a una capa, es necesario que se cumplan las dos condiciones expuestas, no siendo suficiente el cumplimiento de una sola de ellas.

3. Condiciones de ejecución de los arrollamientos trifásicos a dos capas

Para poder ejecutar un arrollamiento a dos capas, dados los valores del número N de ranuras, del número $2p$ de polos y del número m de fases, es necesario y suficiente que se cumpla la única condición:

N/tm = número entero.

Así, para poder ejecutar un arrollamiento trifásico ($m = 3$) a dos capas, bastará que se cumpla:

$N/3t$ = número entero.

Ejemplo:

El primer ejemplo del epígrafe anterior, para $N = 15$ y $p = 2$, indicaba que para estos datos no es posible ejecutar un arrollamiento trifásico a una capa. ¿Es posible ejecutarlo a dos capas?

Se tiene: $N/tm = N/3t = 15/3 \cdot 1 = 5$, número entero.

Por tanto, en una máquina con 15 ranuras y 4 polos, es posible ejecutar un arrollamiento trifásico simétrico a dos capas.

Ejemplo:

El segundo ejemplo del epígrafe anterior, para $N = 24$ y $p = 3$, indicaba que para estos datos no es posible ejecutar un arrollamiento trifásico a una capa. ¿Es posible ejecutarlo a dos capas?

Se tiene: $N/tm = N/3t = 24/3 \cdot 3 = 24/9 = 2,66$, número fraccionario.

Por tanto, no es posible, para una máquina con 24 ranuras y 6 polos, ejecutar un arrollamiento trifásico simétrico a dos capas.

Como se habrá observado, los arrollamientos a dos capas exigen solamente el cumplimiento de una única condición para ser ejecutados, mientras que los arrollamientos a una capa exigen el cumplimiento de dos condiciones.

De ello resulta que mientras que todos los arrollamientos que pueden ser ejecutados a una capa, también admiten la ejecución a dos capas, muchos de los arrollamientos que no pueden ser ejecutados a una capa, tienen posibilidad de ser realizados a dos capas.

Esto sucede muy a menudo en los arrollamientos fraccionarios, o sea, en aquellos en los que el número q de ranuras por polo y fase ($q = N/2p \cdot m$) no es un número entero; aquí, frecuentemente, no se puede ejecutar el arrollamiento a una capa, pero sí a dos capas.

Los arrollamientos a una capa exigen una condición más porque en ellos es necesario que el número de lados positivos de cada devanado parcial sea igual al número de lados negativos del mismo devanado, ya que cada bobina está formada por un lado positivo y otro negativo.

Sin embargo, en los arrollamientos a dos capas, el número de lados positivos puede ser mayor que el de los negativos (o menor), en cuanto nos referimos a los que dibujamos en la estrella de ranuras, ya que para cada lado de la capa inferior (que son los de la estrella), siempre encontraremos otro correspondiente en la capa superior, de modo que se completarán todas las bobinas.

En la segunda parte de este capítulo, analizaremos cómo se distribuyen los rayos de la estrella de ranuras cuando $N/6$ no es un número entero, cuestión que hemos soslayado hasta ahora para no complicar el principio.

Parte II:
ARROLLAMIENTOS A DOS CAPAS, CON N/6 NO ENTERO

1. Introducción

Hemos visto en la primera parte de este capítulo que, cuando $N/6$ no es un número entero, no es posible ejecutar un arrollamiento trifásico a una capa; pero que, cualquiera que sea el valor de $N/6$ (aunque sea fraccionario), siempre que se cumpla que $N/3t$ es un número entero, es posible realizar el arrollamiento trifásico a dos capas.

En el capítulo VIII, cuando dimos la regla para repartir los rayos de la estrella de ranuras entre los tres devanados parciales del arrollamiento trifásico, decíamos que, en primer lugar, se escogen $N/6$ rayos de la estrella de ranuras. Pero: ¿qué sucede si $N/6$ no es una número entero? Si, por ejemplo, $N/6 = 3,5$ — como sucede para $N = 21$ ranuras —, ¿como podemos escoger tres rayos y medio?

Este problema es el que analizaremos en esta segunda parte de este capítulo, estudiándolo a través de varios ejemplos, para mejor comprensión.

2. Ejemplo 1: N = 15 ranuras, 2p = 4 polos

Se tiene que en este caso $t = 1$. Así, el número de rayos de la estrella de ranuras es $N/t = 15$.

El ángulo existente entre dos rayos consecutivos es $\beta = 360 \cdot t/N = 360/15 = 24°$. Además, el ángulo entre dos rayos de numeración consecutiva es $\alpha = 360 \cdot p/N = 2\beta = 48°$.

De lo anterior se llega al dibujo de la estrella de ranuras correspondiente a este caso, y a la numeración de sus rayos, como muestra la figura 80. Siguiendo análogo proceso al que hasta ahora seguimos en todos los ejemplos estudiados, deberíamos tomar $N/6$ rayos de la estrella, que for-

maran entre sí el menor ángulo posible, rayos que serían considerados como lados positivos de las bobinas del primer devanado parcial.

La dificultad en este caso radica en que $N/6 = 15/6 = 2{,}5$ no es un número entero.

Sin embargo, aunque el arrollamiento no puede ejecutarse a una capa (precisamente por no cumplir la condición: $N/6$ = número entero), sí es posible ejecutarlo a dos capas, ya que $N/tm = 15/3 = 5$ es entero. La pregunta es: ¿Cómo deben repartirse entonces los rayos de la estrella de ranuras?

La solución es la siguiente:

Tomaremos para cada devanado parcial, en este caso, *tres* lados positivos y *dos* lados negativos, escogiéndolos entre los de la estrella de ranuras de modo análogo al de siempre, tal como representa la figura 81.

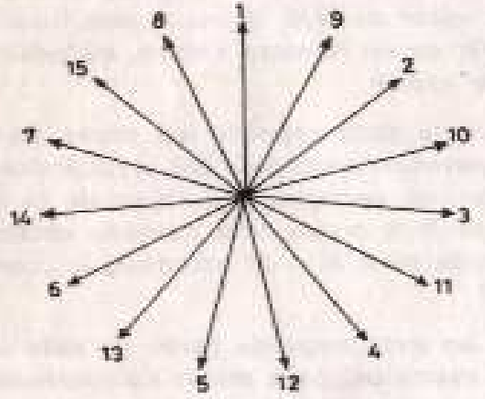


Fig. 80. — Estrella de ranuras para N = 15 y p = 2. Se tiene: t = 1; N/t = 15 rayos; β = 360 t/N = 24°; α = 360 p/N = 48° = 2β.

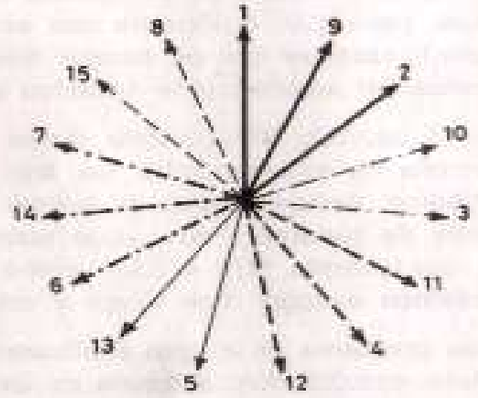


Fig. 81. — Reparto de rayos de la estrella N = 15, p = 2, para m = 3 fases. Por fase: 3 rayos positivos y 2 negativos.

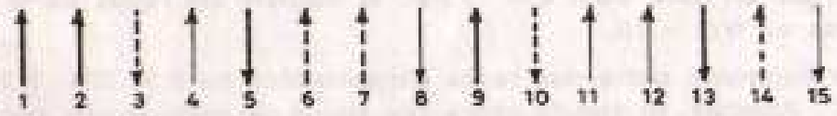


Fig. 82. — Los rayos de la estrella (N = 15, p = 2, m = 3) se sitúan sobre las correspondientes ranuras alineadas, con sus sentidos de corriente.

El hecho de que, en cada devanado parcial, el número de lados positivos sea diferente del número de lados negativos (en el dibujo de la estrella), no es problema, ya que se trata de ejecutar arrollamientos a dos capas.

Escogidos los rayos positivos y negativos de cada devanado parcial (capa inferior del arrollamiento), los trasladamos sobre las ranuras alineadas del plan de arrollamiento (fig. 82), para dibujar después los lados de bobinas de la capa superior, una vez se haya escogido el paso del devanado.

3. Ejemplo 2: N = 21 ranuras, 2p = 2 polos

Se tiene que, en este caso, $t = 1$. Así, el número de rayos de la estrella de ranuras es $N/t = 21$.

El ángulo existente entre dos rayos consecutivos es $\beta = 360 \cdot t/N = 360/21 = 17{,}14°$, que coincide con el valor del ángulo α existente entre dos rayos de numeración consecutiva.

De lo anterior se llega al dibujo aproximado de la estrella de ranuras (la práctica del método demuestra que no es necesaria la extrema exactitud en el dibujo de los ángulos que forman la estrella, lo que en muchos casos sería engorroso), y a la numeración de los rayos de la misma, resultando la figura 83.

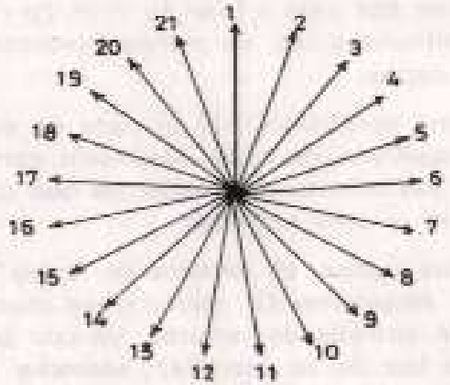


Fig. 83. — Estrella de ranuras para N = 21 y p = 1. Se tiene: t = 1; N/t = 21 rayos; β = 360 t/N = 17,14°; α = 360 p/N = 17,14° = β.

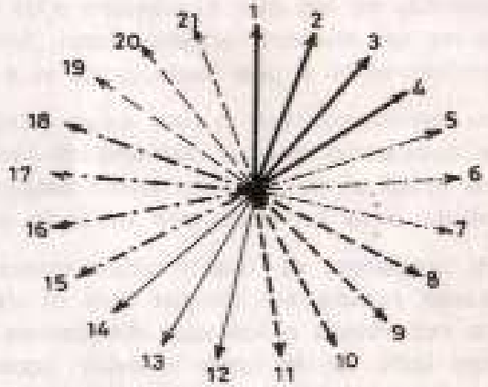


Fig. 84. — Reparto de rayos de la estrella N = 21, p = 1, para m = 3 fases. Por fase: 4 rayos positivos y 3 negativos.

En la marcha general, habría que tomar $N/6 = 21/6 = 3{,}5$ rayos consecutivos de la estrella de ranuras, rayos que serían considerados como lados positivos de las bobinas del primer devanado parcial.

Al ser $N/6 = 3{,}5$ un número fraccionario, no hay posibilidad de ejecutar un arrollamiento a una capa; pero como $N/tm = 21/3 = 7$, es entero, sí es posible realizar un arrollamiento trifásico a dos capas.

Por consiguiente:

Tomaremos para cada devanado parcial, en este caso, *cuatro* lados positivos y *tres* lados negativos, escogiéndolos entre los de la estrella de ranuras de modo análogo al que siempre se ha seguido, con lo que se llega a la figura 84.

La distribución de estos lados sobre las ranuras alineadas del plan del arrollamiento, está representada en la figura 85.

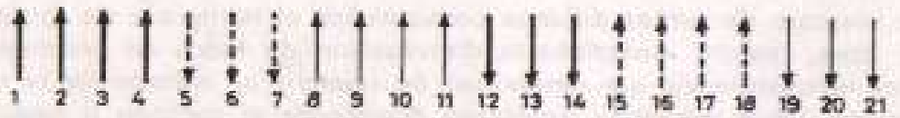


Fig. 85. — Los rayos de la estrella (N = 21, p = 1, m = 3) se sitúan sobre las correspondientes ranuras, con sus sentidos de corriente.

Más adelante, fijado el paso del devanado que se desea, se dibujará el plan completo del arrollamiento, al situar los correspondientes lados de bobinas de la capa superior.

4. Conclusión

Cuando $N/6$ no es un número entero, no se puede ejecutar un arrollamiento trifásico a una capa. Pero si $N/3t$ es un número entero, será posible realizar el arrollamiento a dos capas, cualquiera que sea el valor de $N/6$.

Para ello se tomarán $(N/6) + 0{,}5$ rayos de la estrella de ranuras como lados positivos de cada devanado parcial (capa inferior), y $(N/6) - 0{,}5$ rayos de la estrella como lados negativos de cada devanado parcial (capa inferior).

Estos rayos se tomarán en la estrella de ranuras siguiendo las mismas indicaciones del método general. Después se distribuirán sobre las ranuras alinesdas del plan del arrollamiento, y se procederá como se ha venido haciendo siempre.

Parte III:
ARROLLAMIENTOS MIXTOS

1. Introducción

En el capítulo VII, epígrafe 8, al explicar en qué consisten los arrollamientos mixtos, ya indicamos que se estudiarían aparte para evitar al lector posibles confusiones.

Suponemos que al llegar a estas líneas, el lector ya tiene conceptos claros sobre los arrollamientos a una y dos capas. Para entender bien los arrollamientos mixtos es, además, necesario tener en cuenta la relación entre el valor del número q de ranuras por polo y fase, y el número de bobinas que componen los grupos de los arrollamientos a una y dos capas. Por ello recomendamos al lector un repaso de cuanto se dijo en el epígrafe 7 del capítulo VII.

La ventaja de los arrollamientos mixtos reside, esencialmente, en la simplicidad y economía de su ejecución, de cara siempre al taller de bobinado; por esto se ejecutan con preferencia cuando el factor tiempo desempeña un papel importante, por ejemplo, en la fabricación en serie.

La distribución de lados de bobinas en los arrollamientos mixtos, sobre todo cuando q es fraccionario, es entendida por el personal de taller mucho más fácilmente que la distribución que se obtiene a partir del método de la estrella de ranuras. Por esto, aunque esta última distribución proporciona el mayor rendimiento eléctrico de la máquina, no hay que echar en saco roto la posible eliminación de errores que se consigue mediante el empleo de arrollamientos mixtos.

2. Número de bobinas por grupo, en los arrollamientos mixtos

En los arrollamientos enteros a una y a dos capas, vimos que el número de bobinas que forman cada grupo es igual a:

— $q/2$, cuando las cabezas de bobinas se disponen en tres planos,
— q, en todos los demás casos.

Cuando q es un número fraccionario, y se obtiene el plan del arrollamiento según el método de la estrella de ranuras, ya no se encuentra una relación clara entre el valor de q y el número de bobinas que componen cada grupo del arrollamiento, número que en este caso varía de un grupo a otro.

La razón de ello es porque, si bien el cociente $N/2p \cdot m$, o sea el valor de q, puede ser un número fraccionario, como en los arrollamientos a una y dos capas el número de conductores es igual en todas las bobinas, no existe ninguna posibilidad de hacer grupos con un número fraccionario de bobinas.

Sin embargo, no existe ningún inconveniente en la práctica para hacer grupos de bobinas en los cuales no todas las bobinas tengan el mismo número de conductores. Por ejemplo, puede construirse un grupo de bobinas que conste de una bobina con 20 conductores y de otra bobina con 10 conductores, de modo que se podría hablar de un grupo con 1,5 bobinas, o sea, con una bobina y media.

En esta posibilidad de construir bobinas de un grupo cada una o alguna con diferente número de conductores que las otras, están basados los arrollamientos mixtos.

Naturalmente, como el número total de conductores de una ranura debe ser el mismo para todas las ranuras (cualquiera que sea el tipo de arrollamiento ejecutado), en aquellas ranuras donde se disponga media bobina (o sea, una bobina con la mitad de conductores), se colocará también otra media bobina de otro grupo, para completar la ranura.

De este modo, en los arrollamientos mixtos, nos encontraremos con ranuras ocupadas por un solo lado de bobina (como en los arrollamientos a una capa), y con ranuras ocupadas por dos lados de medias bobinas (capas superior e inferior, como en los arrollamientos a dos capas).

En vez de tomar medias bobinas, caben otras posibilidades, puesto que no hay ningún inconveniente, cuando el valor de q así lo requiera, de tomar terceras, cuartas, quintas... partes de bobinas; sin embargo, por ser menos frecuente su aplicación, y no añadir nada al concepto fundamental, nos limitaremos a estudiar aquellos arrollamientos mixtos que utilizan grupos en los que aparecen bobinas con la mitad de conductores que los de las bobinas de su mismo grupo que llenan toda su ranura.

3. Método general para determinar el plan de arrollamientos mixtos

Si se atiende a la distribución de los lados de bobinas en cualquier plan de arrollamiento, se observa que — de izquierda a derecha — primero se sitúan lados de bobinas de la fase 1, después lados de bobinas de la fase 3, enseguida lados de bobinas de la fase 2, para repetirse seguidamente en este mismo orden: lados de la fase 1, de la fase 3, de la fase 2, etcétera.

Según esto, como en los arrollamientos mixtos cada grupo de bobinas consta siempre de tantas bobinas como indica el número q de ranuras por polo y fase, resulta inmediata la distribución de lados de bobinas en el plan del arrollamiento, sin necesidad de recurrir al método de la estrella de ranuras. Unos ejemplos aclararán enseguida el método a seguir:

Sea el arrollamiento mixto para una máquina con $N = 15$ ranuras, $2p = 2$ polos y $m = 3$ fases.

El valor del número de ranuras por polo y fase es: $q = N/2p \cdot m = 15/6 = 2{,}5$.

Habrá que tomar, pues, grupos de dos bobinas y media; es decir, grupos con un total de tres bobinas, dos de las cuales llevarán doble número de conductores que la tercera del grupo.

Para distribuir los lados de bobinas sobre el plan del arrollamiento, dibujaremos primero los 3 lados de bobinas del primer grupo de la fase 1. Irán sobre las ranuras 1, 2 y 3 (trazo grueso, fig. 86): los lados sobre las ranuras 1 y 2 ocuparán toda su ranura, pero el lado sobre la ranura 3, que lleva la mitad de conductores, ocupará solamente media ranura (capa inferior).

Fig. 86. — Distribución de los lados de las bobinas, y sentidos de corriente, en arrollamientos mixtos para $N = 15$; $2p = 2$; $m = 3$ ($q = 2{,}5$).

A continuación, dibujaremos 3 lados de bobinas de un grupo de la fase 3, que es la que sigue en orden a la fase 1. Aprovechando el espacio sobrante en la ranura 3, se dispondrán los lados de bobinas sobre las ranuras

3, 4 y 5, de tal modo que el lado sobre la ranura 3 es el de la bobina con la mitad de conductores (trazo de rayas, fig. 86).

Después se situarán los tres lados de bobinas del primer grupo de la fase 2, sobre las ranuras 6, 7 y 8, siendo el lado sobre la ranura 8 el que corresponde a la bobina con la mitad de conductores (trazo fino, fig. 86). El proceso continúa del mismo modo: nuevamente para la fase 1, después para la fase 3, y seguidamente para la fase 2, hasta concluir el número total de ranuras del arrollamiento.

Una vez obtenida la distribución de los lados de bobinas sobre el plan del arrollamiento, solamente queda decidir y dibujar el tipo de arrollamiento mixto que para esa distribución se desea ejecutar (en dos planos, en tres planos; con bobinas concéntricas, trapeciales, iguales, etc.).

Es evidente que se deberá escoger aquella ejecución que resulte más adecuada a las condiciones particulares de cada taller. En la figura 87 se ha dibujado el plan completo del arrollamiento mixto, para los datos del ejemplo, con bobinas de peso constante.

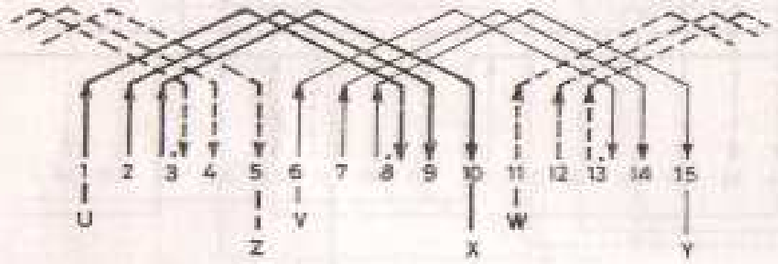


Fig. 87. — N = 15, 2p = 2, m = 3. Plan del arrollamiento mixto, con bobinas iguales (q = 2,5).

Resolveremos otro ejemplo para acabar de fijar ideas:

Sea ahora el arrollamiento mixto para una máquina con $N = 18$ ranuras, $2p = 4$ polos y $m = 3$ fases.

El valor del número de ranuras por polo y fase es: $q = N/2p \cdot m = 18/12 = 1{,}5$.

Habrá que tomar, pues, grupos de una bobina y media; es decir, grupos con un total de dos bobinas, una de las cuales llevará doble número de conductores que la otra del grupo.

La distribución de los lados de bobinas viene en la figura 88 que el lector comprenderá fácilmente.

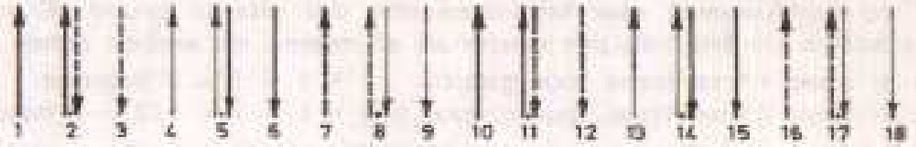


Fig. 88. — Distribución de los lados de las bobinas, y sentidos de corriente, en arrollamientos mixtos para N = 18, 2p = 4, m = 3 (q = 1,5).

A la vista de esta distribución, hay que decidir y dibujar el tipo de arrollamiento mixto que se desea ejecutar. En la figura 89 se ha realizado el arrollamiento mixto correspondiente a este caso, con bobinas rectangulares concéntricas.

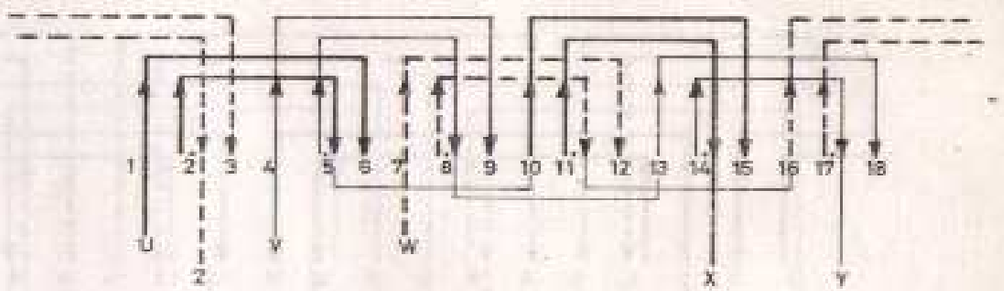


Fig. 89. — N = 18, 2p = 4, m = 3. Plan del arrollamiento mixto, con bobinas concéntricas (q = 1,5).

4. Arrollamientos mixtos cuando q es un número entero

Hasta ahora hemos hablado de arrollamientos mixtos solamente cuando el valor del número q de ranuras por polo y fase es fraccionario. Pero se pueden ejecutar arrollamientos mixtos también cuando q es entero, si con ello se obtienen ventajas de ejecución.

En efecto, consideremos por ejemplo que el número q de ranuras por polo y fase es $q = 3$. Se trata de un arrollamiento entero, que tendría 3 bobinas por grupo si se ejecutara a una o a dos capas. Realizarlo a una capa con cabezas de bobinas en tres planos, no tendría aquí sentido, porque q es impar, y no se puede subdividir en dos partes iguales (ver capítulo VII, § 7).

Pero, en vez de tomar 3 bobinas por grupo, teniendo las tres bobinas el mismo número de conductores, no hay teórica ni prácticamente ningún inconveniente de tomar grupos de 4 bobinas, dos de las cuales tengan la mitad de conductores que las otras dos del mismo grupo. El número total efectivo de bobinas por grupo es el mismo en ambos casos, pues:

— En el caso 1.° se tiene, por grupo: $1 + 1 + 1 = 3$ bobinas.
— En el caso 2.° se tiene, por grupo: $1/2 + 1 + 1 + 1/2 = 3$ bobinas.

Como aclaración definitiva, veamos el arrollamiento mixto para el caso de una máquina con $N = 36$ ranuras, $2p = 4$ polos y $m = 3$ fases.

El valor del número de ranuras por polo y fase es: $q = N/2p \cdot m = 36/12 = 3$. Se podrán tomar, pues, grupos de 3 bobinas, todas con el mismo número de conductores, o, también, grupos de 4 bobinas, dos de las cuales tengan la mitad de conductores que las otras dos del mismo grupo (o sea: $1/2 + 1 + 1 + 1/2 = 3$).

(para los mismos datos iniciales), las siguientes ventajas de ejecución:

— Se pueden disponer las cabezas de bobinas cómodamente en tres planos, mientras que en el arrollamiento a una capa, si se ejecutara en tres planos, al ser q impar se tendrían grupos con diferentes números de bobinas (con una y con dos bobinas), lo que representaría una pérdida de espacio en la máquina, y otra pérdida de tiempo en el torno dé devanar.
— Se obtiene un acortamiento del paso, que es aquí $y = 1 : 7 : 9$, mientras que en el arrollamiento a una capa habría que ejecutar necesariamente el paso $y = 1 : 7 : 9 : 11$, con bobinas concéntricas, o el paso $y = 1 : 10$, con bobinas iguales.
— Como consecuencia de lo anterior, las cabezas de bobinas son más cortas, lo que supone mayor comodidad al insertar el arrollamiento, y mejor aprovechamiento del espacio.

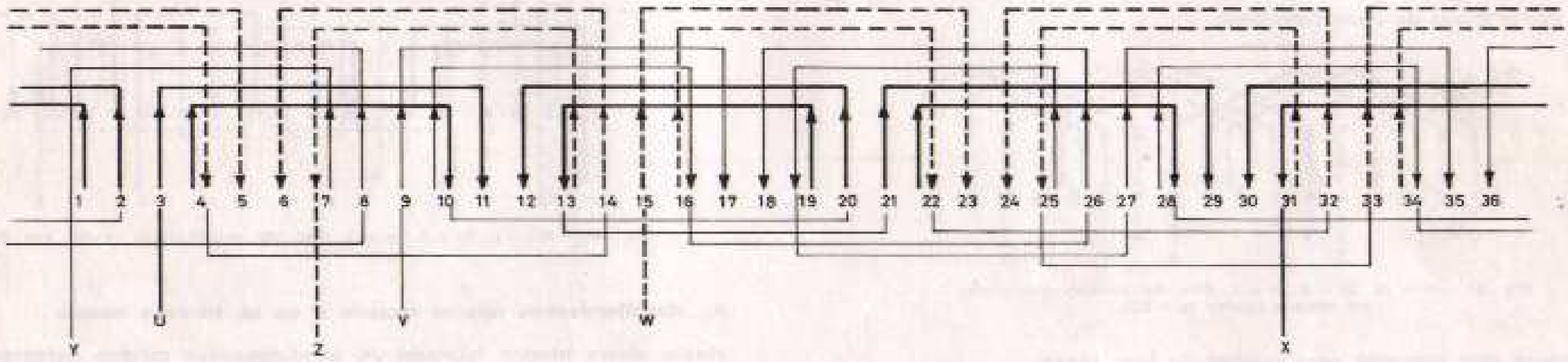


Fig. 90. — N = 36, 2p = 4, m = 3. Plan del arrollamiento mixto, con cabezas de bobinas en tres planos.

La figura 90 muestra el plan completo del arrollamiento mixto, ejecutado con cabezas de bobinas en tres planos (por lo que los grupos son de bobina y media cada uno). La distribución de los lados de bobinas se ha hecho siguiendo el método general expuesto en el epígrafe anterior.

Este arrollamiento mixto presenta respecto al arrollamiento a una capa

Respecto al arrollamiento a dos capas (para los mismos datos iniciales), el arrollamiento mixto presenta la inmediata ventaja de que solamente requiere devanar e insertar un total de 24 bobinas (4 grupos de 2 bobinas, por cada fase), mientras que en el arrollamiento a dos capas, habría que devanar e insertar un total de 36 bobinas (4 grupos de 3 bobinas, por cada fase).

CAPITULO XI

CONEXIONES DE LOS ARROLLAMIENTOS TRIFASICOS

1. Introducción

Como hemos visto, los arrollamientos trifásicos se componen del conjunto ordenado de tres devanados monofásicos cada uno de los cuales, a su vez, está constituido por uno o varios grupos de bobinas conectados eléctricamente entre sí.

Por el método de la estrella de ranuras, aprendimos a determinar el plan del arrollamiento, esto es, cómo se disponen los grupos de bobinas en sus correspondientes ranuras; pero falta saber cómo se conectan entre sí dichos grupos, cuestión muy importante.

En este capítulo analizaremos las conexiones posibles de los arrollamientos trifásicos, es decir, de los grupos de bobinas que forman los tres devanados parciales, de modo que, tras la conexión, se obtengan únicamente los seis terminales: *U*, *V*, *W* y *X*, *Y*, *Z*.

2. El grupo de bobinas como unidad fundamental de conexión

Cada grupo de bobinas de un devanado, cualquiera que sea el número de bobinas parciales que lo componen (que puede ser una sola), consta de un principio *P* y un final *F*, sin ninguna conexión intermedia (cap. VI, § 4).

De este modo, si se dispone de un esquema de las conexiones a verificar, solamente será necesario atender a los terminales *P* y *F* de cada grupo, prescindiendo de cuántas bobinas integran dichos grupos.

En este sentido, el grupo de bobinas se convierte en la unidad fundamental de conexión, y así lo consideraremos, representándolo como muestra la figura 91 *e* cualquiera que sea el número de bobinas parciales que lo constituyen, atendiendo solamente a tres características que lo definirán:

— Fase a la cual pertenece.
— Orden de situación en el plan.
— Sentido de circulación de la corriente.

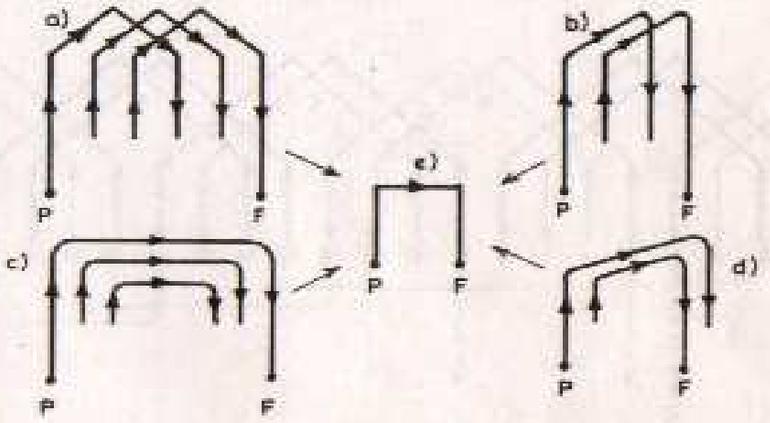


Fig. 91. — Cualquiera que sea el número de bobinas que forman un grupo, y la disposición y forma de sus cabezas (por ejemplo: los grupos a, b, c y d), se representarán según e, indicando el sentido de la corriente.

3. Arrollamientos con polos consecuentes

Consideremos ahora el plan del arrollamiento de la figura 92 correspondiente al caso de una máquina de 8 polos, con 48 ranuras, habiéndose ejecutado el arrollamiento a una capa, con bobinas de paso constante.

Se trata de un arrollamiento entero, puesto que se tiene $q = N/2p \cdot m = 48/8 \cdot 3 = 48/24 = 2$. Por otra parte, el número de bobinas por cada grupo es precisamente $q = 2$ (cap. VII, § 7), mientras que, el número de grupos de bobinas que aparece en cada fase es igual al número p de pares de polos $p = 4$.

En adelante, para facilitar las designaciones, nombraremos a la primera fase (línea de trazo grueso) con la letra *A*, con la letra *B* a la segunda fase (línea de trazo fino), y con la letra *C* a la tercera fase (línea de trazos).

Si, partiendo del primer grupo de la fase *A*, recorremos todo el plan del arrollamiento de izquierda a derecha y, simultáneamente, anotamos el orden de aparición de cada grupo de bobinas, encontraremos la siguiente sucesión:

Grupo 1: fase *A*,	grupo 2: fase *B*,	grupo 3: fase *C*,
grupo 4: fase *A*,	grupo 5: fase *B*,	grupo 6: fase *C*,
grupo 7: fase *A*,	grupo 8: fase *B*,	grupo 9: fase *C*,
grupo 10: fase *A*,	grupo 11: fase *B*.	grupo 12: fase *C*.

Así, pues, en los arrollamientos con polos consecuentes se tiene:

— La sucesión de las fases es: *ABC ABC ABC ABC*, etc.

— La fase *A* consta de los grupos: 1, 4, 7, 10, 13, etc.
La fase *B* consta de los grupos: 2, 5, 8, 11, 14, etc.
La fase *C* consta de los grupos: 3, 6, 9, 12, 15, etc.

— Todos los grupos consecutivos de cada fase tienen el mismo sentido de circulación de corriente.

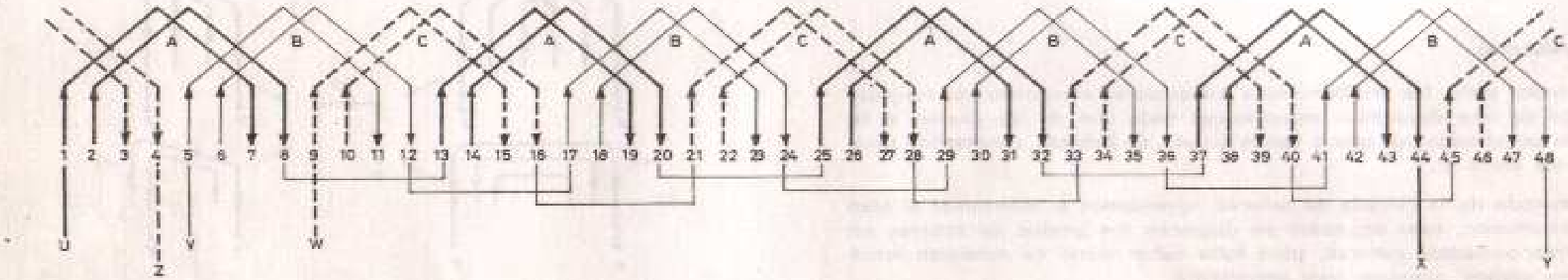


Fig. 92. — N = 48, 2p = 8, m = 3. Plan del arrollamiento a una capa, con bobinas iguales.

O sea, el orden de sucesión de las fases es: *ABC ABC ABC ABC*, mientras que, en el devanado correspondiente a cada fase, los grupos de bobinas llevan el orden de colocación:

Fase *A*: grupo 1, grupo 4, grupo 7, grupo 10.
Fase *B*: grupo 2, grupo 5, grupo 8, grupo 11.
Fase *C*: grupo 3, grupo 6, grupo 9, grupo 12.

Lo que hemos analizado para un ejemplo concreto, el de la figura 92, se puede extender a *todos los arrollamientos de polos consecuentes*, tanto si son arrollamientos enteros como si son fraccionarios, y cualquiera que sea la disposición de las cabezas de bobinas.

En cuanto al sentido de la corriente en cada grupo, vemos que siempre es el mismo en grupos consecutivos de una misma fase (fig. 92). Los arrollamientos que cumplen esta última condición se suelen denominar de polos consecuentes.

Naturalmente, dependiendo de que *q* sea entero o fraccionario, cada grupo constará de igual o diferente número de bobinas, respectivamente; pero como los grupos tienen siempre un principio *P* y un final *F*, sin conexiones intermedias, se podrán reconocer fácilmente sobre la máquina.

En adelante, consideraremos que el primer grupo escogido pertenece siempre a la fase *A* (principio *U* del devanado), de modo que los demás grupos del arrollamiento quedarán automáticamente asignados a sus fases, resultando, además, definido su número de orden, de acuerdo con lo anteriormente expuesto.

4. Arrollamientos con polos alternados

Sea, ahora el plan del arrollamiento de la figura 93, correspondiente al mismo número de polos y ranuras que el de la figura 92, pero ejecutado

aquí subdividiendo cada grupo de bobinas en dos mitades, de modo semejante al explicado para los arrollamientos con cabezas de bobinas en tres planos (cap. VII, § 5), aunque se han dibujado las cabezas de bobinas trapeciales.

En cuanto al sentido de la corriente, vemos que siempre es contrario en dos grupos consecutivos de una misma fase (fig. 93). Los arrollamientos que cumplen esta última condición los denominaremos arrollamientos de polos alternados.

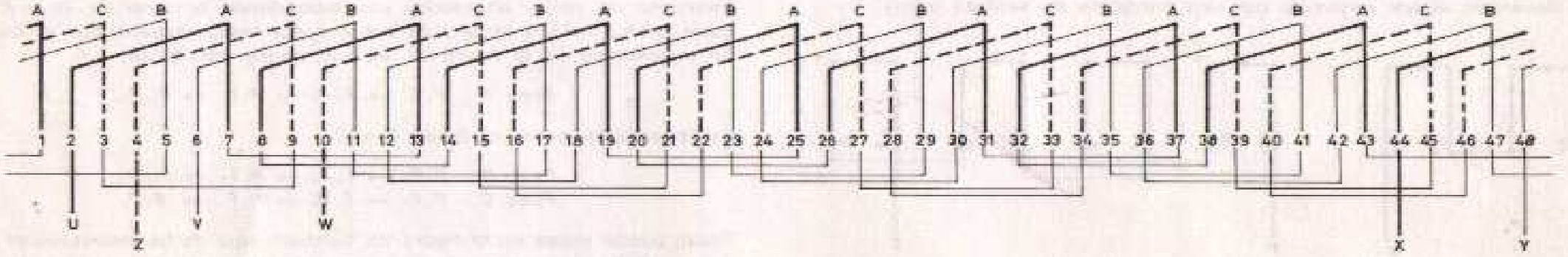


Fig. 93. — N = 48, 2p = 8, m = 3. Plan del arrollamiento, subdividiendo en dos cada grupo de la figura 92 (como en la distribución en tres planos), y con cabezas de bobinas trapeciales.

Puesto que los valores de N y p son los mismos que antes, el arrollamiento es entero, con $q = 2$. El número de bobinas por cada grupo es aquí igual a $q/2 = 1$, es decir, cada grupo consta de una sola bobina (capítulo VII, § 7), mientras que el número de grupos de bobinas que aparece en cada fase es igual al número total de polos, $2p$.

Con la misma notación del epígrafe anterior, al recorrer el plan del arrollamiento de izquierda a derecha, encontramos la siguiente sucesión:

Grupo 1: fase *A*,	grupo 2: fase *C*,	grupo 3: fase *B*,
grupo 4: fase *A*,	grupo 5: fase *C*,	grupo 6: fase *B*,
grupo 7: fase *A*,	grupo 8: fase *C*,	grupo 9: fase *B*,
grupo 10: fase *A*,	grupo 11: fase *C*,	grupo 12: fase *B*.
.....	.....	.....

O sea, el orden de sucesión de las fases es: *ACB ACB ACB ACB*, mientras que en el devanado correspondiente a cada fase, los grupos de bobinas llevan el siguiente orden de colocación:

Fase *A*: grupo 1, grupo 4, grupo 7, grupo 10 ...
Fase *B*: grupo 3, grupo 6, grupo 9, grupo 12 ...
Fase *C*: grupo 2, grupo 5, grupo 8, grupo 11 ...

Lo analizado para el ejemplo concreto representado en la figura 93, se puede extender a *todos los arrollamientos de polos alternados*, tanto si son arrollamientos enteros o fraccionarios, como si se trata de arrollamientos a una o dos capas, y cualquiera que sea la disposición escogida para las cabezas de bobinas.

Analizando los arrollamientos imbricados a dos capas se observa que todos son de polos alternados, teniendo todas las características de éstos:

— La sucesión de las fases es: *ACB ACB ACB ACB*, etc.

— La fase *A* consta de los grupos: 1, 4, 7, 10, 13, etc.
La fase *B* consta de los grupos: 3, 6, 9, 12, 15, etc.
La fase *C* consta de los grupos: 2, 5, 8, 11, 14, etc.

— Dos grupos consecutivos cualesquiera, de cada fase, tienen siempre sentidos opuestos de circulación de corriente.

Naturalmente, según que los arrollamientos sean enteros o fraccionarios, cada grupo tendrá igual o diferente número de bobinas, respectivamente; pero los grupos serán fácilmente reconocidos gracias a sus terminales *P* y *F*, por no existir conexiones intermedias.

5. Conexión en serie de grupos de bobinas

Los grupos de bobinas de cada una de las fases de un arrollamiento trifásico se pueden unir siempre en serie, sin que para ello sea necesario que los grupos cumplan ninguna condición particular. Naturalmente, como para toda unión en serie, las conexiones hay que realizarlas de modo que cada devanado quede recorrido por una corriente de sentido único.

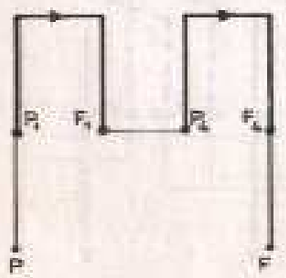


Fig. 94. — Conexión en serie, en arrollamientos de polos consecuentes.

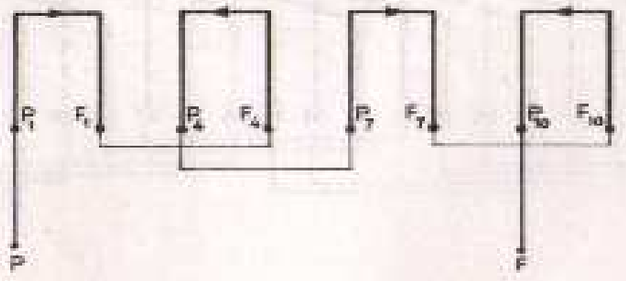


Fig. 95. — Conexión en serie de cuatro grupos de bobinas, en arrollamientos de polos alternados.

Así, por ejemplo, para conectar en serie los grupos de bobinas de la fase *A* del arrollamiento de *polos consecuentes* correspondiente al caso de $2p = 4$ polos (que tendrá $p = 2$ grupos de bobinas por fase), seguiremos el esquema de conexiones de la figura 94, esquema que puede ser expresado escribiendo:

$$\text{Fase } A: \quad P_1 F_1 \rightarrow P_2 F_2$$

Análogamente, para las fases *B* y *C*:

$$\text{Fase } B: \quad P_3 F_3 \rightarrow P_4 F_4$$
$$\text{Fase } C: \quad P_5 F_5 \rightarrow P_6 F_6$$

Como puede verse en la mencionada figura, se ha considerado como principio *P* de cada grupo el terminal situado a la izquierda, mientras que el terminal situado a la derecha se toma como final *F* del grupo; además, cada terminal toma la numeración del grupo al que corresponde. Esta designación es la que aceptaremos de ahora en adelante.

Las conexiones verificadas en la figura 94 responden a la ya expresada condición de que cada devanado sea recorrido según un sentido único de la corriente.

Si se trata de conectar en serie los grupos de bobinas de un arrollamiento de polos alternados, hay que tener en cuenta las particulares características de estos arrollamientos, bien diferentes de los de polos consecuentes.

Así, por ejemplo, para conectar en serie los grupos de la fase *A* del arrollamiento de *polos alternados* correspondiente al caso de $2p = 4$ polos (que tendrá $2p = 4$ grupos de bobinas por fase), seguiremos el esquema de conexiones de la figura 95, el cual puede escribirse:

$$\text{Fase } A: \quad P_1 F_1 \rightarrow F_4 P_4 \rightarrow P_7 F_7 \rightarrow F_{10} P_{10}$$

Análogamente, para las fases *B* y *C*:

$$\text{Fase } B: \quad P_3 F_3 \rightarrow F_6 P_6 \rightarrow P_9 F_9 \rightarrow F_{12} P_{12}$$
$$\text{Fase } C: \quad P_5 F_5 \rightarrow F_8 P_8 \rightarrow P_{11} F_{11} \rightarrow F_2 P_2$$

Como puede verse en la figura 95, también aquí se ha respetado el acuerdo antedicho, respecto a la designación de los terminales de cada grupo. Al cumplir la exigencia de que cada devanado esté recorrido por un sentido único de corriente, se observa — por ejemplo para la fase *A* — la necesidad de unir el final F_1 del primer grupo (fig. 95) con el final F_4 del segundo grupo (en vez de unir F_1 con P_4, como se hacía en los arrollamientos de polos consecuentes), y también, de unir P_4 con P_7, y F_7 con F_{10}. Resumiendo:

Para conectar en serie grupos de bobinas de arrollamientos con *polos alternados, se unen siempre terminales del mismo nombre (es decir, P con P, y F con F)*, mientras que,

para conectar en serie grupos de bobinas de arrollamientos con *polos consecuentes, se unen siempre terminales de nombre distinto (F con P)*.

6. Conexión larga en arrollamientos de polos alternados

La forma de conexión expuesta anteriormente para los arrollamientos de polos alternados, se denomina *conexión corta*. Es la más utilizada en la práctica, pero no la única posible. La regla anterior de conexión en arrollamientos con polos alternados es válida para todas las conexiones cortas, pero hay un tipo de unión en que no se cumple.

En efecto, para el mismo ejemplo del epígrafe anterior, también podríamos conectar los grupos de bobinas según el esquema de la figura 96, que se puede expresar:

$$\text{Fase } A: \quad P_1 F_1 \rightarrow P_7 F_7 \rightarrow F_{10} P_{10} \rightarrow F_4 P_4$$

Y para las fases *B* y *C*:

$$\text{Fase } B: \quad P_3F_3 \rightarrow P_6F_6 \rightarrow F_{12}P_{12} \rightarrow F_9P_9$$
$$\text{Fase } C: \quad P_5F_5 \rightarrow P_{11}F_{11} \rightarrow F_7P_7 \rightarrow F_1P_1$$

Este nuevo tipo de unión, llamado *conexión larga*, presenta algunas ventajas, respecto al tipo de conexión corta, cuando se trata de verificar conexiones en paralelo. Sin embargo, salvo en casos particulares, no se suele utilizar en máquinas de mediana y pequeña potencia, de modo que nosotros siempre nos referiremos a conexiones cortas, aunque no se mencione.

7. Conexión en paralelo de grupos de bobinas

Al contrario que sucedía para la conexión en serie de grupos, los grupos de bobinas de cada fase solamente pueden ser conectados en paralelo cuando cumplen determinadas condiciones. Sobre cuáles son estas condiciones hablaremos más adelante en este mismo capítulo; ahora solamente nos referiremos al modo de realizar dichas uniones.

Estudiemos en primer lugar la conexión en paralelo de grupos de bobinas de arrollamientos con *polos consecuentes*. Sea, por ejemplo, el caso analizado en el epígrafe 5, con $2p = 4$ polos, es decir, teniendo dos grupos de bobinas por fase.

Admitiendo que dichos grupos puedan ser conectados en paralelo, el esquema de conexiones a verificar para la fase *A* será el representado por la figura 97, esquema que se puede expresar escribiendo:

$$\text{Fase } A: \quad P_1F_1 \parallel P_4F_4$$

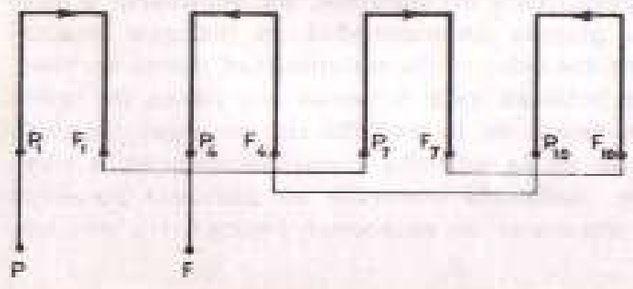


Fig. 96. — Conexión larga, en serie, de cuatro grupos de bobinas, en arrollamientos de polos alternados.

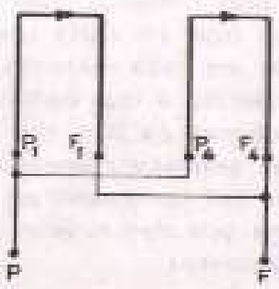


Fig. 97. — Conexión en paralelo, en arrollamientos de polos consecuentes.

Análogamente, para las fases *B* y *C*:

$$\text{Fase } B: \quad P_3F_3 \parallel P_6F_6$$
$$\text{Fase } C: \quad P_5F_5 \parallel P_2F_2$$

O sea, para realizar la conexión en paralelo de dos grupos de bobinas de un devanado de *polos consecuentes*, *se unirán entre sí los principios P* de los grupos y, por otra parte, *se unirán entre sí los finales F*.

Considerando ahora la conexión en paralelo de grupos de bobinas de arrollamientos de *polos alternados*, supongamos que se trata de unir en paralelo las 4 bobinas del devanado *A* de un arrollamiento con $2p = 4$ polos. Admitiendo que dichos cuatro grupos puedan ser conectados en paralelo, el esquema de conexiones será el representado en la figura 98 *a*, figura junto a la cual se ha dibujado una simplificación de dicho esquema (figura 98 *b*), con el fin de aclarar más el método de conexión. Escribiremos:

$$\text{Fase } A: \quad P_1F_1 \parallel F_4P_4 \parallel P_7F_7 \parallel F_{10}P_{10}$$

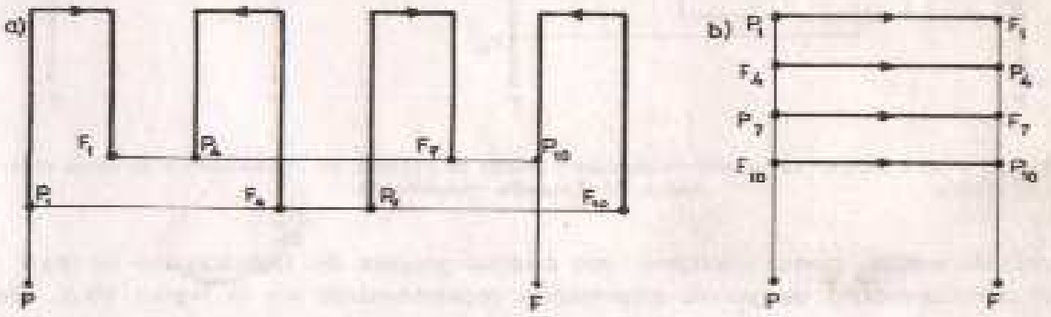


Fig. 98. — a) Conexión en paralelo de cuatro grupos de bobinas, en arrollamientos de polos alternados. b) Esquema simplificado.

De modo análogo, se obtiene para las restantes fases:

$$\text{Fase } B: \quad P_3F_3 \parallel F_6P_6 \parallel P_9F_9 \parallel F_{12}P_{12}$$
$$\text{Fase } C: \quad P_5F_5 \parallel F_2P_2 \parallel P_{11}F_{11} \parallel F_7P_7$$

Según puede observarse, debido a que el sentido de la corriente es opuesto en grupos consecutivos, aquí aparecen unidos, alternativamente, un principio *P* y un final *F* (en la figura 98, para la fase *A* se conectan por un lado: P_1, F_4, P_7, F_{10}, y por otro: F_1, P_4, F_7, P_{10}), mientras que en los arrollamientos de polos consecuentes, como el sentido de la corriente es el

mismo para grupos consecutivos, al unir en paralelo grupos de bobinas, se conectan entre sí terminales del mismo nombre (según la figura 97, para la fase *A* se conectan por un lado: P_1, P_4, y por otro: F_1, F_4).

8. Conexión en serie-paralelo de grupos de bobinas

Cuando en un devanado existen más de dos grupos de bobinas, es posible en determinados casos conectar en serie algunos de los grupos, formando así conjuntos de grupos y, después, unir en paralelo estos conjuntos. Evidentemente, como ya se dijo, para poder verificar conexiones en paralelo será necesario que se cumplan ciertas condiciones.

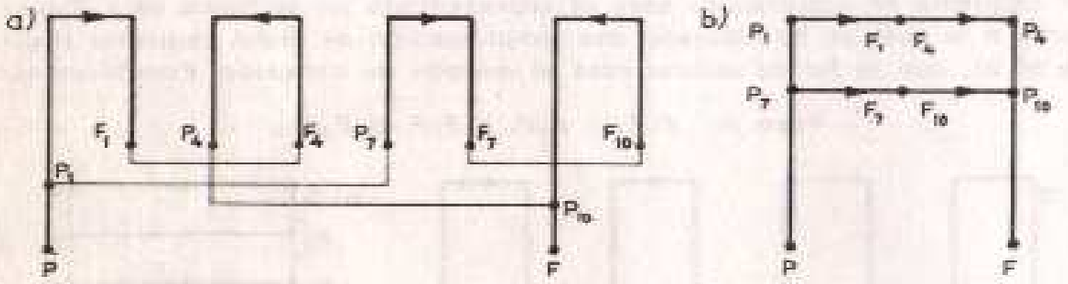


Fig. 99. — a) Conexión serie-paralelo de cuatro grupos de bobinas, en arrollamientos de polos alternados. b) Esquema simplificado.

Consideremos, como ejemplo, los cuatro grupos de bobinas de la fase *A* del arrollamiento de polos alternados representado en la figura 99 *a*. Mediante un par de conexiones cortas, podemos unir en serie los grupos 1-4, por una parte, y los grupos 7-10, por otra. Obtenemos así dos conjuntos de grupos que, admitiendo que pueden ser conectados en paralelo, se unirán según el esquema de la figura 99 *a*, al lado de la cual se ha dibujado una simplificación de dicho esquema (fig. 99 *b*) para facilitar la comprensión.

Las conexiones llevadas a cabo para la fase *A* pueden expresarse:

$$\text{Fase } A: \quad P_1 F_1 \rightarrow F_4 P_4 \parallel P_7 F_7 \rightarrow F_{10} P_{10}.$$

De modo análogo, las conexiones serie-paralelo para las restantes fases son:

$$\text{Fase } B: \quad P_3 F_3 \rightarrow F_6 P_6 \parallel P_9 F_9 \rightarrow F_{12} P_{12}$$
$$\text{Fase } C: \quad P_5 F_5 \rightarrow F_8 P_8 \parallel P_{11} F_{11} \rightarrow F_2 P_2$$

El lector no tendrá dificultad en interpretar correctamente el esquema de conexión serie-paralelo verificado para los cuatro grupos de un arrollamiento de polos consecuentes (así que $2p = 8$), que muestra la figura 100 *a* y *b*, para el devanado *A*.

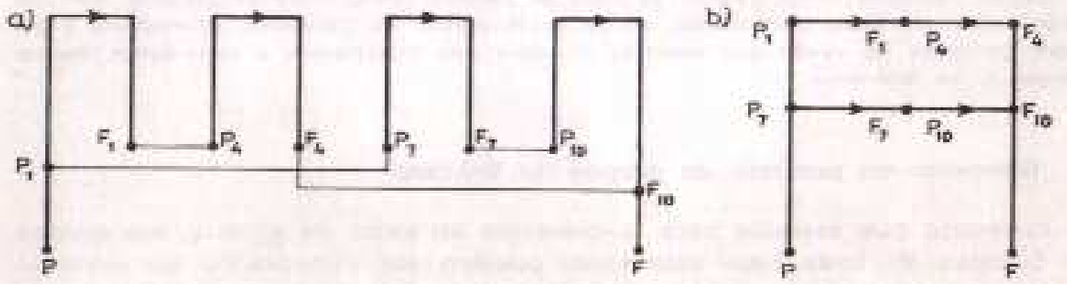


Fig. 100. — a) Conexión serie-paralelo de cuatro grupos de bobinas, en arrollamientos de polos consecuentes. b) Esquema simplificado.

Las conexiones llevadas a cabo para las tres fases, pueden expresarse:

$$\text{Fase } A: \quad P_1 F_1 \rightarrow P_4 F_4 \parallel P_7 F_7 \rightarrow P_{10} F_{10}$$
$$\text{Fase } B: \quad P_2 F_2 \rightarrow P_5 F_5 \parallel P_8 F_8 \rightarrow P_{11} F_{11}$$
$$\text{Fase } C: \quad P_3 F_3 \rightarrow P_6 F_6 \parallel P_9 F_9 \rightarrow P_{12} F_{12}$$

9. Posibilidad de conexión en paralelo de grupos de bobinas

Para que dos o más grupos de bobinas de un devanado parcial de un arrollamiento trifásico puedan ser conectados en paralelo, es necesario y suficiente que en cada uno de los grupos considerados se induzca exactamente, en cada instante, la misma tensión, tanto en amplitud como en fase. Atendiendo a que cada grupo de bobinas está formado por pares de lados de bobinas (o sea, por pares de rayos de la estrella de ranuras), bastará sumar geométricamente los rayos de la estrella correspondientes a cada grupo del devanado en cuestión, *pudiendo conectar en paralelo aquellos grupos que den origen a sumas idénticas en magnitud (módulo) y en fase (argumento)*.

En la práctica, el método indicado resulta demasiado lento, así como excesivamente complicado para un taller de bobinado. Por ello, veremos otro

sistema de aplicación sencilla y rápida, que explicaremos a través de un buen número de ejemplos.

10. Método práctico para determinar las posibles conexiones en paralelo

La posibilidad de unir en paralelo grupos de bobinas de un devanado parcial de un arrollamiento trifásico, es debida a particulares simetrías de dicho arrollamiento.

Si uno o más grupos de cada devanado se repiten a lo largo del arrollamiento un número z (entero) de veces, teniendo cada vez la misma posición relativa respecto a los otros devanados del arrollamiento, será posible establecer un número máximo de z ramas en paralelo, en cada devanado parcial.

La forma más sencilla y segura para determinar si un devanado se repite del modo expresado, consiste en escribir uno tras otro los grupos de bobinas que componen el arrollamiento, asignándole la fase a la que corresponde y, además, el número de bobinas que lo forma, observando si se repiten ciertos conjuntos.

Lo aclararemos con varios ejemplos:

Ejemplo 1: Sea el arrollamiento correspondiente a una máquina de $N = 24$ ranuras y $2p = 4$ polos, ejecutado a una capa, con bobinas de paso constante.

El plan del arrollamiento, pendiente de conexiones, se ha representado en la figura 101. Se trata de un arrollamiento entero, de polos consecuentes, con $q = N/2p \cdot m = 24/12 = 2$ bobinas por grupo, y con $p = 2$ grupos por fase.

Como se ha venido haciendo en todas las figuras, se representa de trazo grueso la fase *A*, de trazo fino la fase *B* y de trazo discontinuo la fase *C*. Se advierte de la figura que la sucesión de las fases es *ABC*, esto es, que se trata de un arrollamiento de polos consecuentes.

Escribiendo debajo de la sucesión *ABC* de las fases el número de bobinas que integran cada grupo (lo que se lee del plan del arrollamiento), tendremos:

ABC	*ABC*
222	222

En este caso destaca inmediatamente la existencia de dos conjuntos idénticos y, por tanto, la posibilidad de disponer un *máximo de dos ramas en paralelo* (por fase).

Ejemplo 2: Consideremos el mismo caso anterior, con $N = 24$ y $2p = 4$, pero ejecutando ahora el arrollamiento a dos capas (paso del devanado $y = 1\text{-}6$).

El plan del arrollamiento, todavía sin conexiones, se ha representado en la figura 102. Se trata de un arrollamiento entero, de polos alternados, con $q = 2$ bobinas por grupo, y con $2p = 4$ grupos por fase.

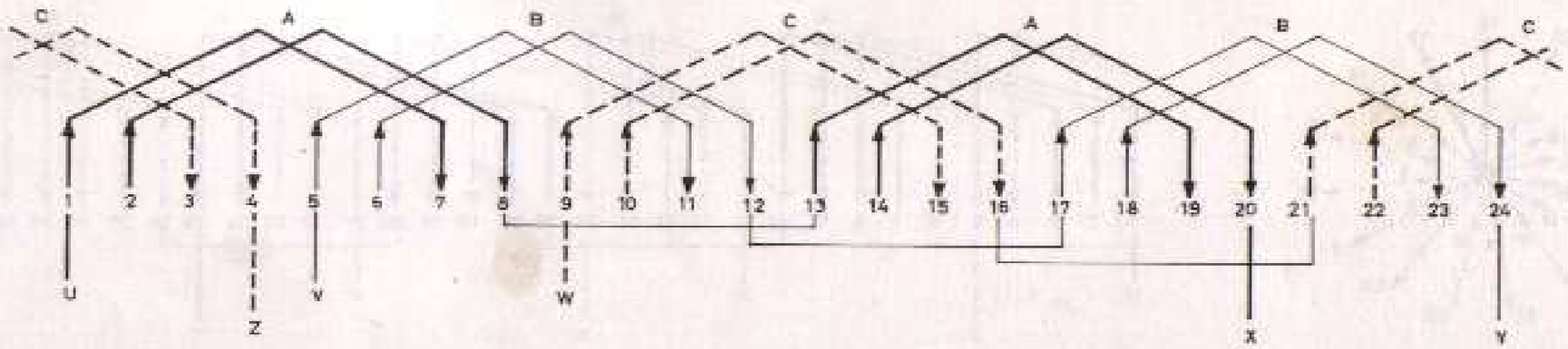


Fig. 101 — N = 24, 2p = 4, m = 3. Plan del arrollamiento a una capa, con bobinas iguales.

Escribiendo debajo de la sucesión *ABC* de las fases el número de bobinas que tiene cada grupo, tendremos:

ACB	*ACB*	*ACB*	*ACB*
222	222	222	222

El plan del arrollamiento, todavía sin conexiones, se ha deducido de la estrella de ranuras correspondiente (fig. 103), y se representa en la figura 104. Se trata de un arrollamiento fraccionario ($q = 30/12 = 2{,}5$), de polos consecuentes, y con $p = 2$ grupos por fase.

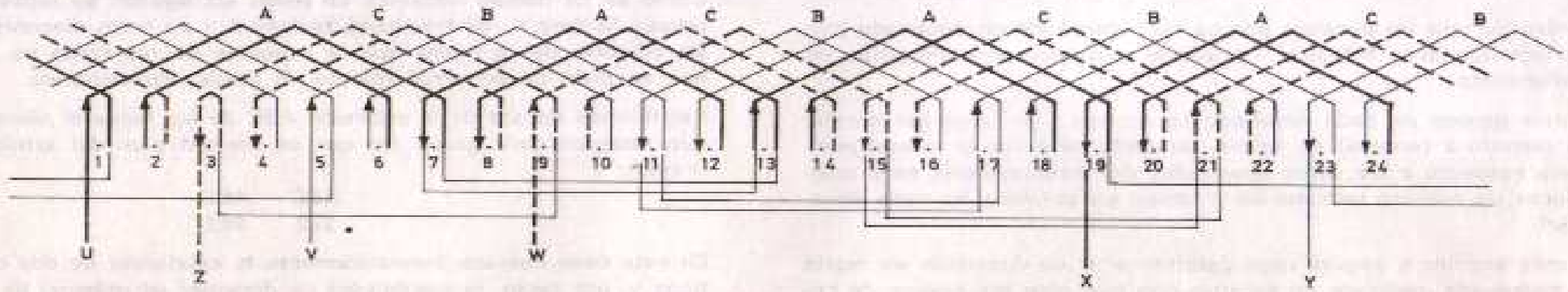


Fig. 102. — N = 24, 2p = 4, m = 3. Plan del arrollamiento a dos capas, tomando como paso del devanado y = 1 : 6.

Deduciendo a simple vista que existen cuatro conjuntos idénticos y, por tanto, hay posibilidad de disponer de *cuatro ramas en paralelo, como máximo* (por fase).

Ejemplo 3: Sea, ahora, el arrollamiento correspondiente a una máquina con $N = 30$ ranuras y $2p = 4$ polos, ejecutado a una capa, con bobinas trapeciales de paso variable.

Escribiendo debajo de la sucesión *ABC* de las fases el número de bobinas que integra cada grupo, tendremos:

ABC	*ABC*
323	232

De modo que no aparece ninguna repetición en el arrollamiento y, por lo tanto, no hay posibilidad de efectuar conexiones en paralelo.

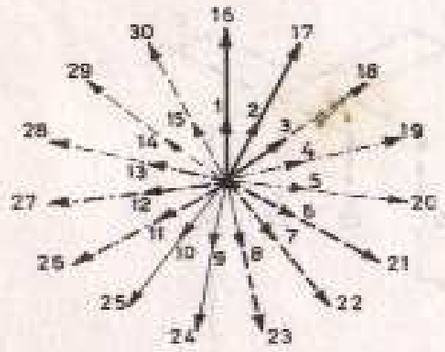


Fig. 103. — Estrella de ranuras para N = 30, p = 2 y m = 3.

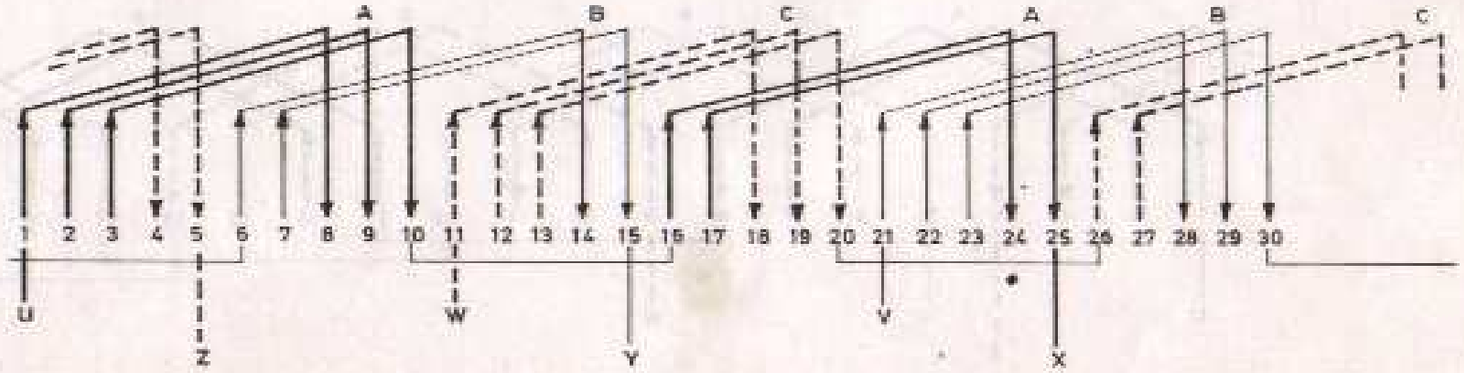


Fig. 104. — N = 30, 2p = 4, m = 3. Plan del arrollamiento a una capa, con bobinas de forma trapecial y paso variable. Arrollamiento fraccionario (q = 2,5) de polos consecuentes.

Ejemplo 4: Partimos de los datos iniciales del ejemplo anterior, o sea: $N = 30$ ranuras y $2p = 4$ polos, pero ejecutando ahora el arrollamiento a dos capas, con paso $y = 1 : 7$.

La estrella de ranuras correspondiente a este arrollamiento, obtenida según las indicaciones del capítulo VIII, se había dibujado en la figura 103.

El arrollamiento que resulta, todavía sin conexiones, es el representado en la figura 105. Se trata de un arrollamiento fraccionario, de polos alternados (como son todos los de dos capas), con $2p = 4$ grupos de bobinas por fase, teniendo dos de los grupos tres bobinas, y el resto con dos bobinas por grupo.

Ejemplo 5: Sea el mismo caso anterior, con $N = 30$ ranuras y $2p = 4$ polos, para un arrollamiento también a dos capas, pero partiendo de la estrella de ranuras representada en la figura 106.

Comparando esta estrella de ranuras con la del ejemplo anterior (fig. 103), observamos que la única diferencia consiste en que aquí, en vez de tomar $N/6 = 5$ rayos positivos y otros $N/6 = 5$ rayos negativos para cada fase, se han tomado 6 rayos positivos (uno más que antes) y 4 rayos negativos (uno menos que antes) para cada fase.

Evidentemente, esta nueva distribución de los rayos de la estrella, que se

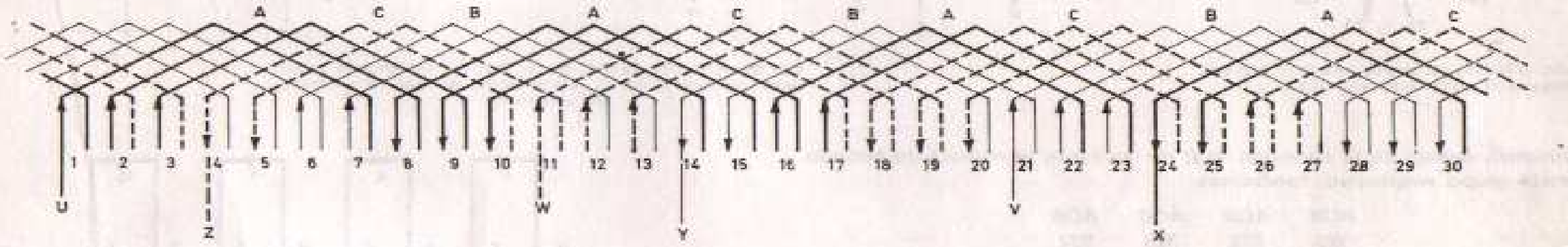


Fig. 105. — N = 30, 2p = 4, m = 3. Plan del arrollamiento a dos capas, con paso y = 1 : 7.

Escribiendo debajo de la sucesión *ACB* de las fases el número de bobinas que integra cada grupo, se tiene:

ACB	*ACB*	*ACB*	*ACB*
322	332	233	223

Este esquema muestra claramente que tampoco aquí aparece ninguna repetición en el arrollamiento y que, en consecuencia, no existe posibilidad de ejecutar conexiones en paralelo.

Sin embargo, el interés práctico que presentan las conexiones en paralelo (ver § 11), inclina a menudo a modificar los arrollamientos en favor de la simetría, como vamos a ver en el ejemplo que a continuación exponemos:

aparta de las reglas dadas en el capítulo VIII, no podría hacerse si se tratara de un arrollamiento a una capa, ya que en ellos es absolutamente necesario que el número de rayos positivos sea igual al número de rayos negativos en cada fase. Sin embargo, para los arrollamientos a dos capas, no existe este inconveniente (ver capítulo X, II, § 2).

La estrella de ranuras con el reparto de rayos que indica el capítulo VIII proporciona, desde luego, el arrollamiento más conveniente desde el punto de vista de aprovechamiento eléctrico de la máquina; o sea: da la mayor potencia con el menor número de espiras por bobina. Sin embargo, se prefiere a veces apartarse algo de las reglas del reparto de rayos de la estrella, si se obtiene con ello la ventaja de poder realizar conexiones en paralelo.

El plan del arrollamiento correspondiente a la estrella de ranuras de la figura 106 es el representado en la figura 107, en la cual se han indicado los principios y finales de los grupos de bobinas de la fase *A*.

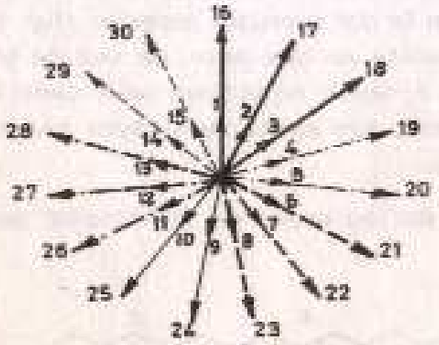


Fig. 106. — Estrella de ranuras para $N = 30$, $p = 2$. Reparto de rayos modificado, para $m = 3$.

Todavía veremos otro ejemplo semejante a éste, para insistir en la posibilidad de realizar conexiones en paralelo mediante la modificación del reparto de rayos en la estrella de ranuras original.

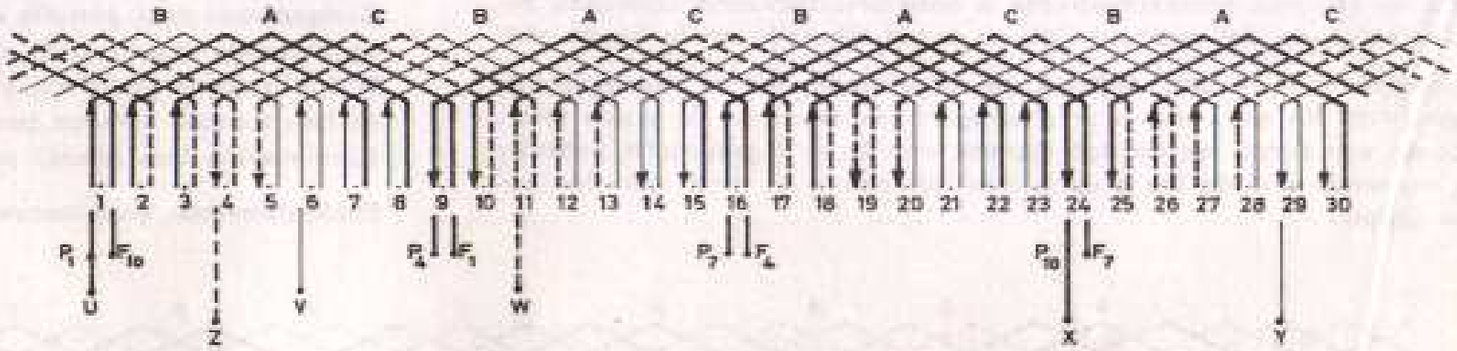


Fig. 107. — $N = 30$, $2p = 4$, $m = 3$. Plan del arrollamiento a dos capas, con paso $y = 1 : 7$, con el reparto de rayos de la estrella de la figura 106.

Escribiendo debajo de la sucesión *ACB* de las fases el número de bobinas de cada grupo respectivo, tendremos:

ACB	*ACB*	*ACB*	*ACB*
323	232	323	232

De donde se desprende que el conjunto:

ACB	*ACB*
323	232

se repite una vez; de modo que, al existir en el arrollamiento dos conjuntos idénticos, es posible disponer *dos ramas en paralelo* (por fase).

Asimismo, se deduce cómo deben de ser realizadas las conexiones. En efecto, refiriéndose a cada fase: los dos grupos de bobinas del conjunto que se repite habrán de unirse en serie entre sí, mientras que los dos conjuntos idénticos se unirán entre sí en paralelo.

El esquema de conexiones para la fase *A* será el de la figura 108, que escribiremos:

$$\text{Fase } A: \quad P_1 F_1 \rightarrow F_4 P_4 \parallel P_7 F_7 \rightarrow F_{10} P_{10}$$

De modo análogo realizaríamos las conexiones serie-paralelo para las dos fases restantes.

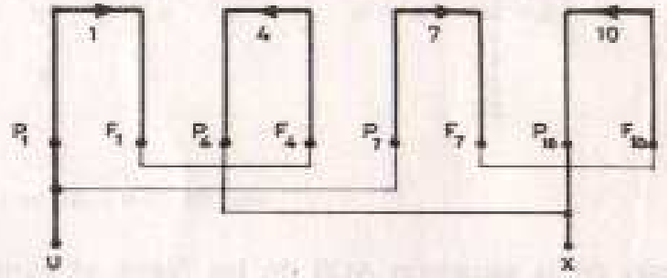


Fig. 108. — Esquema de conexiones serie-paralelo, para la fase A del arrollamiento de la figura 107.

Ejemplo 6. Sea ahora el arrollamiento a dos capas para el caso de una máquina con $N = 42$ ranuras y $2p = 8$ polos.

La estrella de ranuras obtenida según las indicaciones del capítulo VIII (conviene que el lector la obtenga como ejercicio), es la representada en la figura 109. Aquí se han tomado, según las reglas, $N/6 = 7$ rayos positivos y otros tantos negativos por cada fase.

El plan del arrollamiento correspondiente a esta estrella de ranuras, para el paso $y = 1 : 6$, es el que muestra la figura 110.

Escribiendo debajo de la sucesión *ACB* de fases el número de bobinas que integra cada grupo, se tiene:

ACB	*ACB*	*ACB*	*ACB*	*ACB*	*ACB*	*ACB*	*ACB*
222	122	122	221	221	222	212	212

Muy a menudo, prevalece el interés de obtener ramas en paralelo (incluso en algunos casos se exige así), y de ahí el interés de modificar el reparto de rayos de la estrella de ranuras, apartándose de las reglas dadas, a sabiendas de que se pierde algo de potencia si se mantiene el mismo número de espiras por bobina.

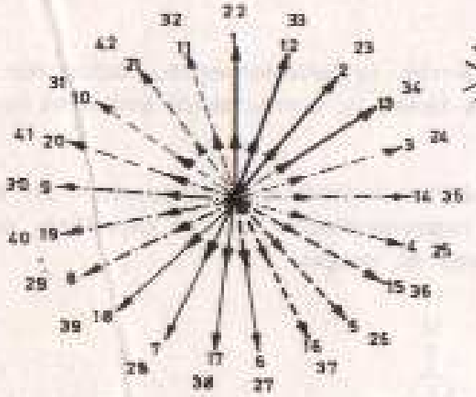


Fig. 109. — Estrella de ranuras para N = 42, p = 4. Reparto usual de rayos, para m = 3.

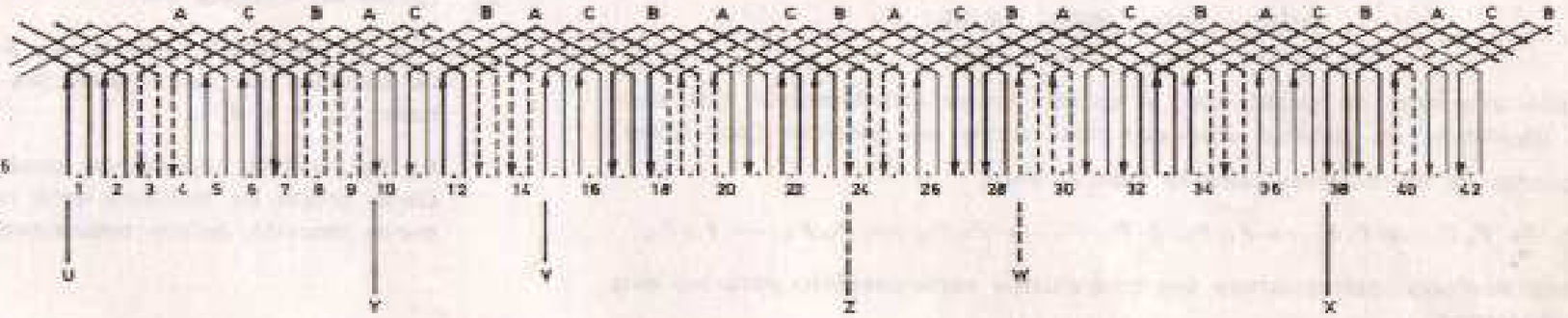


Fig. 110. — N = 42, 2p = 8, m = 3. Plan del arrollamiento a dos capas, con paso y = 1 : 6.

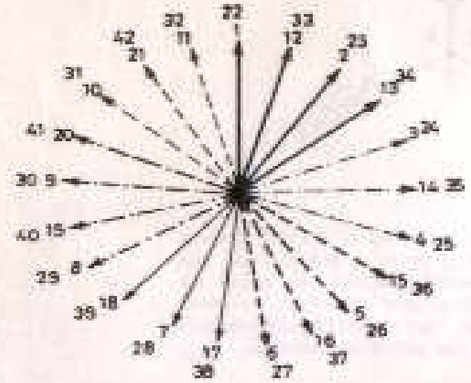


Fig. 111. — Estrella de ranuras para N = 42, p = 4. Reparto de rayos modificado, para m = 3.

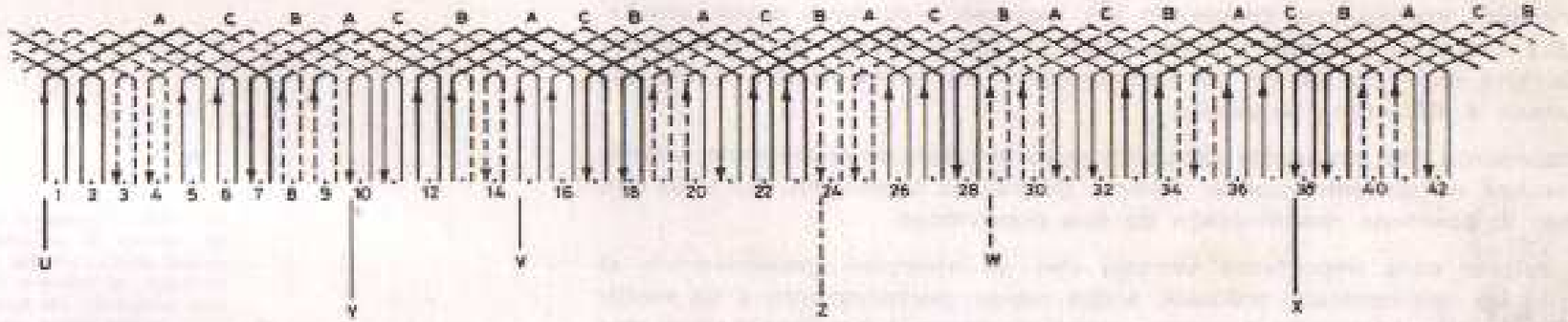


Fig. 112. — N = 42, 2p = 8, m = 3. Plan del arrollamiento a dos capas, con paso y = 1 : 6, con el reparto de rayos de la estrella de la figura 111.

Este arrollamiento es el más ventajoso en cuanto a que con el menor número de espiras por bobina la máquina da la mayor potencia; sin embargo, como se deduce del esquema anterior, no permite la disposición de ramas en paralelo.

Si, en este caso, en vez de tomar 7 rayos positivos y 7 negativos por cada fase, tomamos 8 rayos positivos (o sea, uno más) y 6 rayos negativos (o sea, uno menos) por fase, resulta la estrella de ranuras representada en la figura 111.

El arrollamiento correspondiente a esta estrella es el de la figura 112, y del mismo obtenemos el siguiente esquema:

ACB	*ACB*	*ACB*	*ACB*	*ACB*	*ACB*	*ACB*	*ACB*
222	122	212	221	222	122	212	221

De donde se desprende que el conjunto:

ACB	*ACB*	*ACB*	*ACB*
222	122	212	221

se repite una vez; de modo que, al existir en el arrollamiento dos conjuntos idénticos, es posible disponer *dos ramas en paralelo* (por fase).

El esquema de conexiones para la fase *A* será:

$$P_1 F_1 \rightarrow F_4 P_4 \rightarrow P_7 F_7 \rightarrow F_{10} P_{10} \parallel P_{13} F_{13} \rightarrow F_{16} P_{16} \rightarrow P_{19} F_{19} \rightarrow F_{22} P_{22}$$

De modo análogo realizaríamos las conexiones serie-paralelo para las dos fases restantes.

11.- Ventajas de los arrollamientos con posibilidades de conexiones en paralelo.

La principal ventaja que presentan los motores eléctricos cuyos arrollamientos inductores admiten conexiones en paralelo, es que — mediante una simple modificación de las conexiones — un mismo motor puede ser conectado a diferentes tensiones.

Análogamente, un generador eléctrico cuyo arrollamiento inducido admite conexiones en paralelo, puede generar diferentes tensiones, sin más que realizar la oportuna modificación de sus conexiones.

Para aclarar esta importante ventaja con un ejemplo, consideremos el caso de un arrollamiento trifásico a dos capas, perteneciente a un motor de cuatro polos (o sea: con cuatro grupos de bobinas por fase), en el que sea posible realizar hasta cuatro ramas en paralelo (es decir, hasta el máximo número posible de conexiones en paralelo).

En este arrollamiento, los grupos de bobinas están repartidos entre las fases del siguiente modo:

Grupos de la fase *A*: 1, 4, 7 y 10
Grupos de la fase *B*: 3, 6, 9 y 12
Grupos de la fase *C*: 5, 8, 11 y 2.

Obsérvese que, al escribir los grupos de cada fase ordenadamente, el primer grupo de la fase *C* es el 5, y no el 2.

El arrollamiento en cuestión permitirá las siguientes conexiones entre los citados grupos:

a) *Conexión estrella serie:*

Que se realizará uniendo en serie, ordenadamente, todos los grupos de bobinas de cada una de las fases, y conectando entre sí los terminales *X*, *Y* y *Z*.

La figura 113 representa simbólicamente la disposición en estrella. Cada grupo de bobinas está representado por un circulito, cuyo número inscrito define totalmente el grupo.

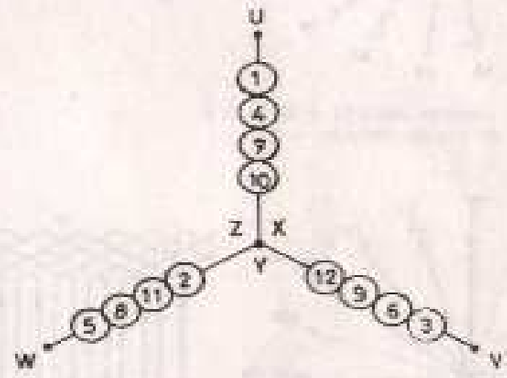


Fig. 113. — Conexión estrella serie de los grupos de bobinas de un arrollamiento a dos capas, con cuatro polos. En los arrollamientos de polos alternados, el número de grupos por fase coincide con el número de polos. Todos los arrollamientos a dos capas son de polos alternados.

Como sabemos, los principios de fase *A*, *B* y *C* son los terminales *U*, *V* y *W*, respectivamente. Naturalmente, los terminales *U*, *V* y *W* coinciden con los principios P_1, P_2 y P_3, respectivamente, de cada fase.

Los finales P_{10}, P_{12} y P_3 del último grupo de cada una de las fases *A*, *B* y *C*, son los terminales *X*, *Y* y *Z*, respectivamente; estos terminales están unidos entre sí, para formar el punto neutro de la estrella.

La figura 114 representa simplificadamente el esquema de conexiones tal como habrán de realizarse en la propia máquina. Presenta así la operación de una manera más intuitiva. Para representar cada grupo se ha prescindido de cuál es el número de bobinas que lo integra.

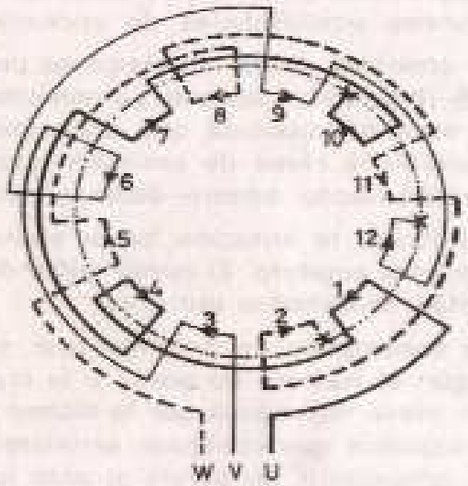


Fig. 114. — Esquema de conexiones para la conexión estrella serie de la figura 113, tal como se deberá realizar sobre la máquina.

De línea gruesa se ha dibujado la fase *A*, de trazos separados aparece representada la fase *C*, y de línea continua fina, la fase *B*.

Los terminales *X*, *Y* y *Z* quedan unidos entre sí por un círculo de conexión, mientras que los terminales *U*, *V* y *W* salen del arrollamiento para ir a la caja de bornes.

b) *Conexión estrella doble paralelo:*

Cuyo esquema de conexión, representado en la figura 115, expresa suficientemente el proceso a seguir.

Se tienen, además, las siguientes otras posibilidades de conexión:

c) *Conexión estrella cuádruple paralelo* (fig. 116).
d) *Conexión triángulo serie* (fig. 117).
e) *Conexión triángulo doble paralelo* (fig. 118).
f) *Conexión triángulo cuádruple paralelo* (fig. 119).

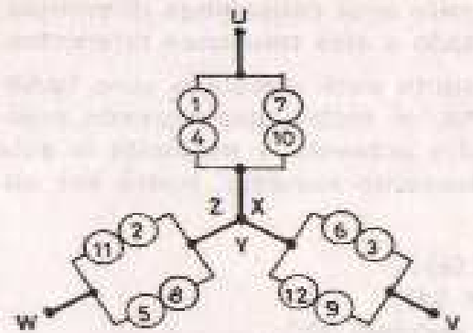


Fig. 115. — Conexión estrella doble paralelo.

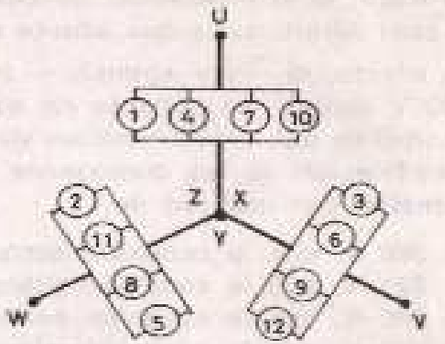


Fig. 116. — Conexión estrella cuádruple paralelo.

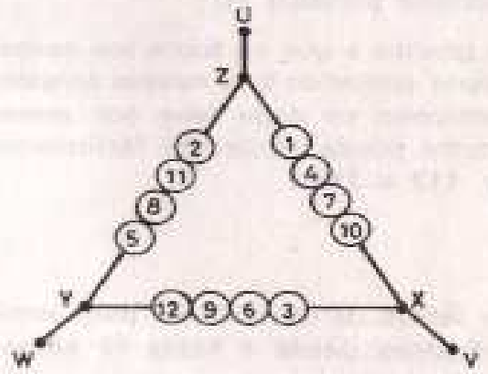


Fig. 117. — Conexión triángulo serie.

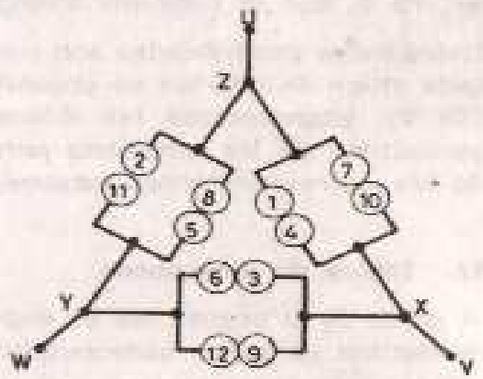


Fig. 118. — Conexión triángulo doble paralelo.

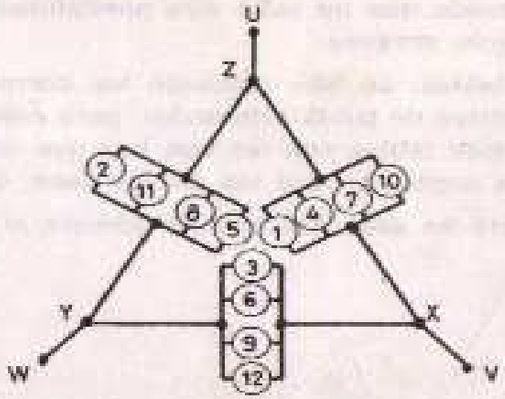


Fig. 119. — Conexión triángulo cuádruple paralelo.

Es decir, el arrollamiento considerado permite seis conexiones diferentes, lo cual quiere decir que admite ser conectado a seis tensiones diferentes.

En efecto, si —por ejemplo— el arrollamiento está calculado para tomar 380 V cuando se conecta en estrella serie, el motor, manteniendo prácticamente sus características de velocidad y potencia, y mediante la sola modificación de las conexiones del arrollamiento inductor, podrá ser alimentado por una red de:

— 380 V, con la conexión estrella serie (a).
— 220 V, con la conexión triángulo serie (d).
— 190 V, con la conexión estrella doble paralelo (b).
— 110 V, con la conexión triángulo doble paralelo (a).
— 95 V, con la conexión estrella cuádruple paralelo (c).
— 55 V, con la conexión triángulo cuádruple paralelo (f).

Todas estas posibilidades son realizables gracias a que en todos los casos cada grupo de bobinas se encuentra siempre sometido a la misma tensión (55 V), obteniéndose las diferentes tensiones en cada fase por suma geométrica de las tensiones parciales, como puede deducirse fácilmente de los correspondientes esquemas (figs. 113 a 119).

12. Tablas de conexiones

A partir de la página 208 se exponen las tablas de conexiones para arrollamientos de polos consecuentes en máquinas desde 4 hasta 12 polos.

No se presenta la tabla correspondiente a máquinas bipolares de polos consecuentes porque, en este caso, cada fase está constituida por un solo grupo ($p = 1$), de modo que no cabe otra posibilidad de conexión que la de estrella o triángulo simples.

Después de estas tablas, se han expuesto las correspondientes a conexiones de arrollamientos de polos alternados, para máquinas desde 2 hasta 12 polos. Estas últimas tablas son las que hay que utilizar para todos los arrollamientos a dos capas (y para los de una capa, de polos alternados).

Para escoger la tabla se atenderá exclusivamente al número de polos, y a si el arrollamiento es de polos consecuentes o, por el contrario, es de polos alternados.

El número N de ranuras donde irá insertado el arrollamiento *no desempeña ningún papel para la elección de la tabla*. Pero, claro está, define el número de bobinas que integra cada grupo y, en consecuencia, influye directamente sobre las diferentes posibilidades de conexión del arrollamiento.

Estas posibilidades de conexión deben investigarse previamente, tal como se ha explicado en el § 10 de este capítulo. La consulta de las tablas sirve solamente para saber sistemáticamente qué conexiones es preciso realizar una vez se ha decidido la clase de conexión deseada, y después de comprobado que el arrollamiento admite dicha conexión.

En las tablas se ha utilizado la notación hasta ahora establecida, largamente utilizada durante este capítulo. El punto entre dos terminales expresa que los mismos están conectados entre sí.

El número máximo de conexiones en paralelo que, teóricamente, admite cada arrollamiento, según el número de polos y la clase del mismo (consecuentes, alternados), viene expresado por la última casilla en cada fase. Naturalmente, ello no significa que cualquier arrollamiento pueda alcanzar el número máximo de conexiones en paralelo; esta cuestión ha de determinarse (repetimos) previamente.

13. Esquemas de conexión

A partir de la página 217, se muestran los esquemas de conexión para arrollamientos de polos consecuentes, y después para polos alternados, en máquinas desde 2 hasta 12 polos.

Se han utilizado siempre conexiones cortas que, como hemos dicho, son las usuales. Sin embargo, atendiendo a lo expresado en el § 6 de este capítulo, se pueden encontrar fácilmente los esquemas correspondientes a conexiones largas.

Los esquemas presentados son de gran utilidad práctica para los talleres de reparación, pues su simplicidad los hace comprensibles para el personal de formación exclusivamente práctica.

CAPITULO XII

MOTORES ASINCRONICOS DE DOS VELOCIDADES

1. Introducción

Los motores asincrónicos trifásicos de dos velocidades son cada vez más frecuentes en la práctica. Resulta, pues, necesario que los bobinadores comprendan claramente las particularidades de los arrollamientos y conexiones que para estos motores se realizan.

Puesto que la velocidad de un motor asincrónico (prescindiendo del deslizamiento) es función expresa de la frecuencia de la red a la que se conecta y del número de polos de la máquina (o sea, del arrollamiento), mientras la frecuencia de alimentación se mantenga constante, no existe otro modo de variar la velocidad del motor si no es modificando el número de polos del arrollamiento.

Una de las formas de conseguir que un motor pueda funcionar a dos velocidades, será simplemente insertando en las ranuras del estator dos arrollamientos independientes, cada uno con diferente número de polos. Entonces, según el arrollamiento que se conecte a la red, el motor girará a una u otra velocidad.

Sobre este sistema, a base de dos arrollamientos independientes, no insistiremos. Evidentemente, en la práctica se pueden presentar dificultades, tanto porque no siempre es posible encontrar dos arrollamientos de diferente polaridad para un único determinado número de ranuras, como porque muy a menudo tienen lugar problemas de arranque y funcionamiento en estos casos. Pero este asunto es cuestión de un profundo estudio de cálculo. Desde el punto de vista del bobinador, sin embargo, el insertar dos arrollamientos distintos no es problema de importancia.

Las dificultades para el bobinador pueden surgir al tener que considerar los arrollamientos llamados de *polos conmutables*, debido a la especial configuración de los mismos y a la particularidad de sus conexiones. Este tipo de arrollamientos es el que analizaremos en este capítulo.

Antes de entrar en el tema, haremos dos importantes advertencias:

— Cuanto menor es el número de polos de un motor, tanto más ancho debe ser el camino previsto para el flujo magnético. Por tanto, un motor cuyo yugo del estator está calculado, por ejemplo, para 8 polos, no admitirá en general el cambio a 4 polos sin graves consecuencias en su funcionamiento. Sobre ello se insiste en el capítulo VI (3.ª parte), al tratar de las modificaciones de las características iniciales de un motor.

— Todo cambio de polaridad del arrollamiento del estator exige análogo cambio en el rotor. Si éste está bobinado, será necesario modificarlo para la nueva polaridad. Si se trata de rotor en jaula de ardilla, no requerirá variación; sin embargo, hay que tener presente que, para cada número de polos, entre el número de ranuras del estator y del rotor debe existir una relación conveniente (ver § 11). Caben, pues, desagradables sorpresas si no se toma en consideración lo apuntado.

2. Arrollamientos de polos conmutables

Atenderemos aquí, solamente, a los arrollamientos cuya relación de polos es de 2 : 1 (por ejemplo: los de 12 y 6 polos, los de 8 y 4 polos, los de 4 y 2 polos). En estos casos, la relación de velocidades es de 1 : 2, o sea, el motor gira más rápido para el menor número de polos.

Entre las diversas soluciones dadas para la conmutación de polos en la relación 2 : 1, está la que proporciona la *conexión Dahlander*, no superada hasta ahora por ningún otro sistema. Será, pues, esta conexión la que estudiaremos seguidamente.

3. Fundamento de la conexión Dahlander

Consideremos las dos bobinas idénticas de la figura 120, conectadas en serie entre sí, recorridas por una corriente eléctrica que entra por el principio *P* de la primera bobina y sale por el final *F* de la segunda.

En estas condiciones, las bobinas crean un campo magnético tal como el representado por las líneas de fuerza dibujadas en la mencionada figura. Aparecen, pues, un total de cuatro polos: dos norte y dos sur.

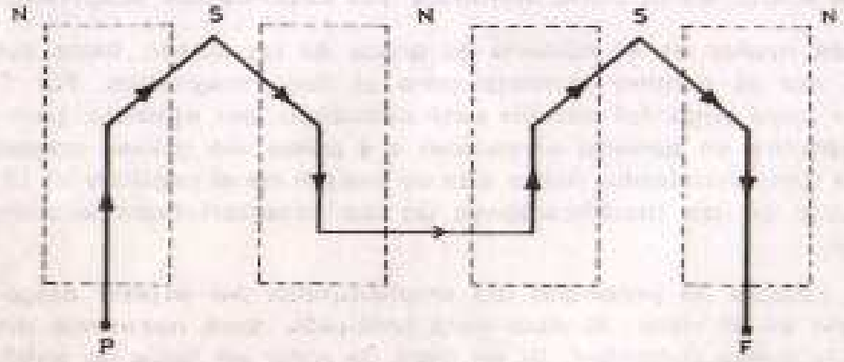


Fig. 120. — Las bobinas crean un campo magnético de cuatro polos.

Si, en cambio, alimentamos las bobinas por una corriente eléctrica que entre por el punto medio *M* de la unión entre ambas (fig. 121), observamos que, entonces, el sentido de la corriente se invierte en la primera bobina, respecto al caso anterior. En consecuencia, se forman ahora solamente dos polos: un norte y un sur, tal como representan las líneas de fuerza de la figura 121.

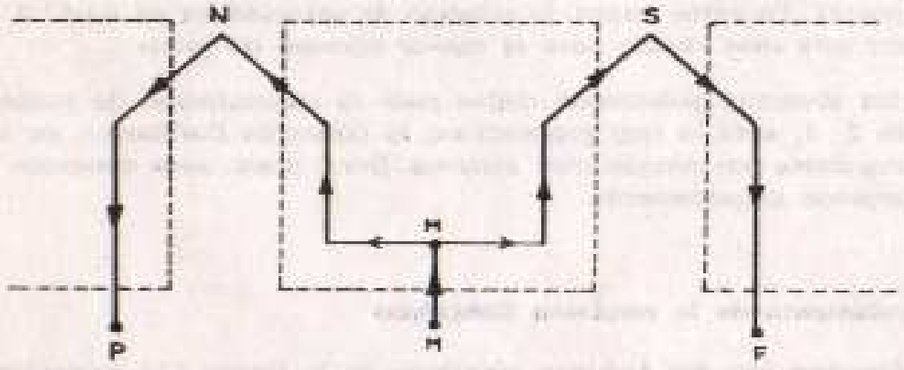


Fig. 121. — Las mismas bobinas de la figura 120 crean ahora un campo magnético de solamente dos polos.

La conexión Dahlander se basa en el sencillo hecho experimental descrito. Mediante una conveniente distribución del arrollamiento, y subdividiendo el mismo acertadamente, es posible obtener dos diferentes polaridades en la relación 2 : 1, sin más que conectar a la red — en cada caso — los oportunos terminales.

4. Método práctico para realizar arrollamientos de polos conmutables

La ejecución práctica de arrollamientos de polos conmutables es cuestión relativamente sencilla. Insistimos nuevamente, sin embargo, en que si todo motor asincrónico requiere un arrollamiento no solamente correcto en su ejecución sino, además, adecuado para el arranque y funcionamiento (relación de ranuras estator/rotor, acortamiento del paso, etc.), en los motores de dos velocidades hay que extremar las precauciones.

La conexión Dahlander se puede aplicar tanto a arrollamientos a una capa como a arrollamientos a dos capas. En la práctica, sin embargo, se utilizan preferentemente estos últimos, de modo que nos referiremos siempre a ellos.

Para ejecutar un arrollamiento previsto para conexión Dahlander, hay que seguir el siguiente procedimiento:

— Se construirá la estrella de ranuras para el *menor número de polos*.

— De acuerdo con la estrella de ranuras y el reparto de rayos, se dibujará el plan del arrollamiento a dos capas (sin conexiones), tomando siempre como paso y del devanado el paso diametral correspondiente al *mayor número de polos*. Si ello no fuera posible, se tomará el paso más próximo al diametral mencionado.

— En cada fase, el número total de grupos se subdividirá en dos mitades idénticas: una que constará de la unión de los grupos impares, y otra que estará formada por la unión de los grupos pares.

Es necesario que las dos mitades del devanado parcial considerado sean idénticas, lo que puede analizarse según lo indicado en el capítulo anterior.

— Las dos mitades de cada fase se unirán entre sí (en serie, o en paralelo), dejando en el puente de unión una salida *M* al exterior.

— De cada fase se tomarán al exterior tres salidas: los terminales *P* y *F* correspondientes al principio y final, y el terminal *M* del puente intermedio.

Conectando convenientemente los mencionados terminales, se consigue obtener una u otra velocidad de giro para el motor.

El método enunciado lo aplicaremos en dos ejemplos, para mejor comprensión.

5. Ejemplo: *Motor trifásico de dos velocidades, las correspondientes a 8 y 4 polos, disponiendo de N = 24 ranuras para el arrollamiento*

De acuerdo con el epígrafe anterior, la estrella de ranuras a considerar es la correspondiente a $N = 24$ y $p = 2$, o sea: para el menor número de polos. Dicha estrella, con el reparto de rayos usual, se ha dibujado en la figura 122.

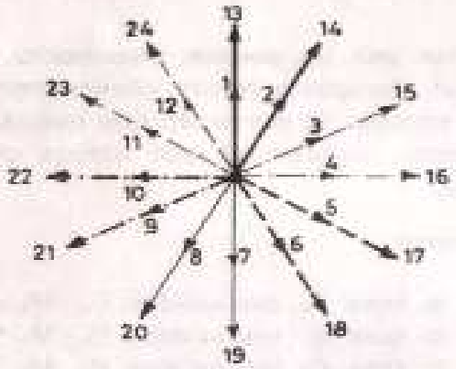


Fig. 122. — Estrella de ranuras para $N = 24$, $p = 2$. Reparto usual de rayos, para $m = 3$.

El paso del devanado se tomará el diametral correspondiente al mayor número de polos. Como $N/2p = 24/8 = 3$, el paso a tomar es $y = 1 : 4$. Con estos datos, se deberá dibujar el plan del arrollamiento, sin conexiones. Para mayor claridad, en la figura 123 solamente se ha representado la fase *A*.

Este devanado parcial consta de cuatro grupos de bobinas, cada uno con dos bobinas. Lo subdividimos en dos mitades (que son idénticas): la formada por los grupos impares 1 — 7, y la que consta de los grupos pares 4 — 10.

Unimos entre sí los grupos impares y, por otra parte, también entre sí los grupos pares, conectando ambos grupos mediante un puente intermedio, tal como representa la figura 123.

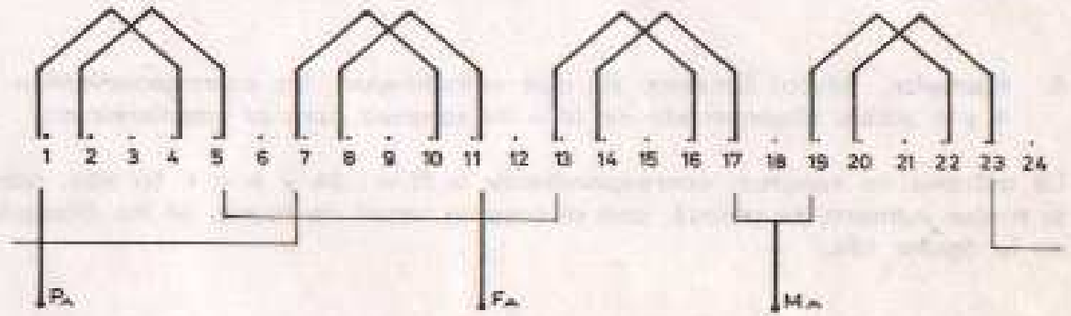


Fig. 123. — $N = 24$, $2p = 8/4$, $m = 3$. Devanado de la fase A.

Hagamos notar lo siguiente:

— La salida del grupo 7 se ha conectado, para formar el puente, con el principio del grupo 10. Se ha prescindido, pues, del sentido de corriente que marca el rayo situado encima de la ranura 19.

— Los grupos pares e impares, cada conjunto por separado, se han conectado en serie. Pero aquí no habría inconveniente alguno en conectarlos en paralelo, dado que el arrollamiento es totalmente simétrico. Igualmente, los grupos pares e impares se han conectado entre sí en serie (mediante el puente), pero tampoco habría nunca inconveniente de conectarlos en paralelo, puesto que — como es necesario — ambos grupos son idénticos.

  Se ha escogido la conexión en serie para no complicar las figuras. En cualquier caso, cada devanado parcial proporciona las mismas tres salidas.

Las salidas del devanado parcial considerado son las que llamaremos P_A, M_A y F_A, como correspondientes al principio, mitad y final de la fase *A*, respectivamente.

Operando de manera análoga en los otros devanados parciales, obtendríamos las salidas P_B, M_B y F_B, de la fase *B*, y las salidas P_C, M_C y F_C, de la fase *C*.

Disponemos, pues, de un total de nueve terminales del arrollamiento. Al concluir los ejemplos, analizaremos cuáles son las conexiones posibles, cómo se realizan y cómo se alimenta el motor para desarrollar una u otra velocidad de giro.

6. **Ejemplo:** *Motor trifásico de dos velocidades, las correspondientes a 4 y 2 polos, disponiendo de N = 24 ranuras para el arrollamiento*

La estrella de ranuras, correspondiente a $N = 24$ y $p = 1$ (o sea, para el mejor número de polos), con el reparto usual de rayos, se ha dibujado en la figura 124.

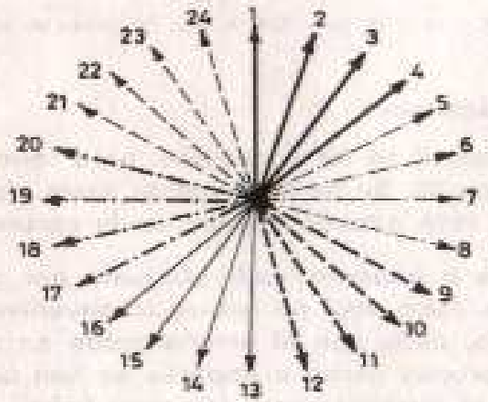


Fig. 124. — Estrella de ranuras para N = 24, p = 1. Reparto usual de rayos, para m = 3.

El paso del devanado se tomará el diametral correspondiente al mayor número de polos. Como $N/2p = 24/4 = 6$, el paso a tomar es $y = 1 : 7$. Con estos datos se podría dibujar el plan del arrollamiento (sin conexiones). Para mayor claridad, se ha representado solamente la fase *C* (figura 125).

Este devanado parcial consta de dos grupos de bobinas; cada grupo con cuatro bobinas. Lo subdividimos en dos mitades (que son idénticas): la del grupo impar 5 y la del grupo par 2.

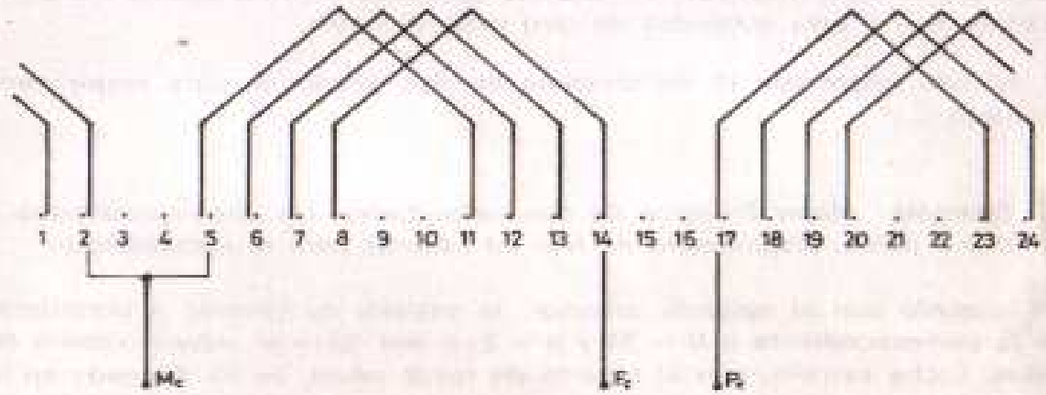


Fig. 125. — N = 24, 2p = 4/2, m = 3. Devanado de la fase C.

Ambos grupos se unen por un puente intermedio, tal como expresa la figura 125. Como en el ejemplo anterior, observemos que la conexión del puente prescinde del sentido de corriente que marca el rayo situado sobre la ranura 5; y asimismo, señalemos que ambos grupos podían haberse conectado en paralelo.

Como antes, se obtienen:

Para la fase *A*: las salidas P_A, M_A y F_A
Para la fase *B*: las salidas P_B, M_B y F_B
Para la fase *C*: las salidas P_C, M_C y F_C

Estos terminales se conectarán entre sí, y a la red, según las indicaciones de los epígrafes siguientes.

7. Diversas conexiones Dahlander

Con los nueve terminales que proporciona el arrollamiento completo, se pueden ejecutar diversas conexiones, de modo que cada par de ellas proporciona dos velocidades de giro del motor.

Entre las diferentes conexiones posibles, vamos a analizar las dos más frecuentes en la práctica, que son:

- La conexión triángulo-estrella doble paralelo, denominada también conexión triángulo-doble estrella ($\triangle/\curlyvee\curlyvee$), y
- La conexión estrella-estrella doble paralelo, llamada también conexión estrella-doble estrella ($\curlyvee/\curlyvee\curlyvee$)

En todos los casos de conexiones, la mayor velocidad del motor, es decir, el menor número de polos, se obtiene cuando las tres conexiones intermedias M_A, M_B y M_C se llevan a la red de alimentación, lo cual está de acuerdo con lo expresado en el epígrafe 3 de este capítulo.

8. Conexión Dahlander: triángulo-estrella doble paralelo

Según esta conexión, en primer lugar, las tres fases del arrollamiento se conectan en triángulo, dejando las conexiones en el interior de la máquina, y sacando a la caja de bornes del motor los seis terminales P_A, P_B, P_C y M_A, M_B, M_C.

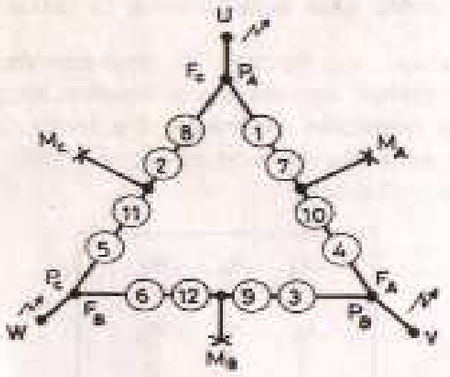


Fig. 126. — Conexión triángulo serie (8 polos) para el ejemplo de la figura 122.

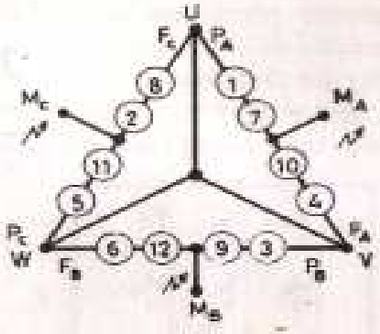


Fig. 127. — Conexión estrella doble paralelo (4 polos) para el ejemplo de la figura 122.

En estas condiciones, el arrollamiento se alimenta de dos modos:

— Para el mayor número de polos (baja velocidad):

- Se dejan M_A, M_B y M_C abiertos.
- Se conectan P_A, P_B y P_C a las fases *R*, *S* y *T* de la red, respectivamente.

— Para el menor número de polos (alta velocidad):

- Se unen entre sí los terminales P_A, P_B y P_C.
- Se conectan M_A, M_B y M_C a las fases *T*, *S* y *R* de la red, respectivamente (atención al orden de conexión indicado, de lo contrario el motor girará en sentido contrario al de la baja velocidad).

La aplicación de lo expresado al ejemplo del epígrafe 5 (con 4 grupos por fase, para 8 y 4 polos), proporcionaría para el caso de 8 polos la conexión en triángulo representada en la figura 126; y para el caso de 4 polos, se tendría la doble estrella de la figura 127, formada a partir del triángulo anterior, al unir entre sí los terminales *P*, formando un punto neutro.

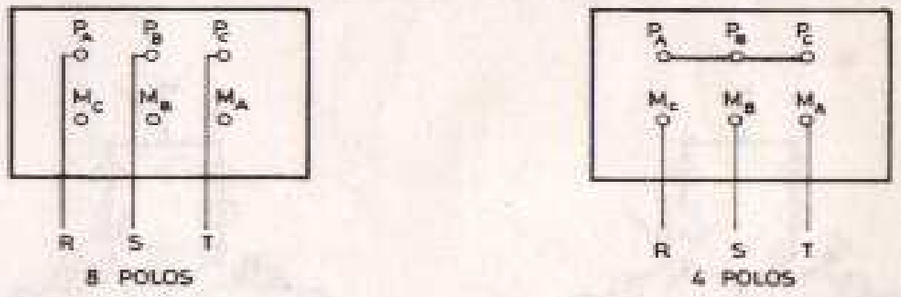


Fig. 128. — Disposición correcta de los terminales en la caja de bornes.

La figura 128 representa la disposición correcta de los terminales en la caja de bornes del motor. El orden en que se han colocado los terminales *M* procura evitar los posibles errores de conexión a la red.

9. Conexión Dahlander: estrella-estrella doble paralelo

Según esta conexión, en primer lugar, las tres fases del arrollamiento se conectan en estrella, dejando las conexiones en el interior de la máquina, y sacando a la caja de bornes del motor los tres terminales *P* y los tres *M*.

En estas condiciones, el arrollamiento se alimenta de dos modos:

— Para el mayor número de polos (baja velocidad):

- Se dejan M_A, M_B y M_C abiertos.
- Se conectan P_A, P_B y P_C a las fases R, S y T de la red, respectivamente.

— Para el menor número de polos (alta velocidad):

- Se unen entre sí los terminales P_A, P_B y P_C.
- Se conectan M_A, M_B y M_C a las fases T, S y R de la red, respectivamente (atención al orden de conexión indicado).

La aplicación de lo expresado al ejemplo del epígrafe 5, proporcionaría para el caso de 4 polos la conexión en estrella representada en la figura 129; y para el caso de 2 polos, se tendría la doble estrella de la figura 130, formada al unir entre sí los terminales P.

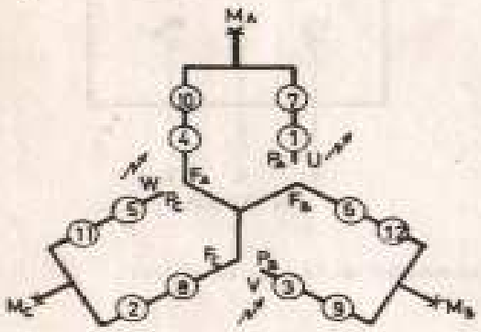


Fig. 129. — Conexión en estrella (4 polos) para el ejemplo de la figura 124.

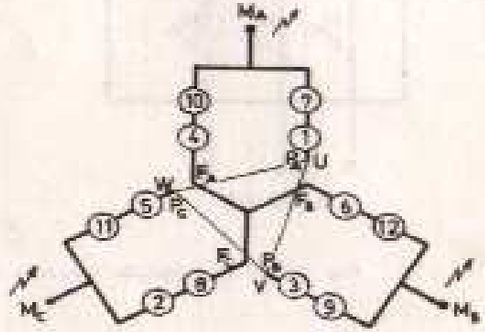


Fig. 130. — Conexión en estrella doble paralelo (2 polos) para el ejemplo de la fig. 124.

La figura 128 representa la disposición correcta de los terminales en la caja de bornes del motor. Insistimos de nuevo en el cuidado que hay que tener en colocar los terminales M en el orden indicado. Si la conexión tiene lugar a través de un conmutador, es preciso asegurarse previamente de que conmuta correctamente.

10. Normas alemanas para la designación de los terminales

Del mismo modo que los principios de fase, y los finales, son designados por las normas alemanas con las letras U, V y W, y X, Y y Z, respectivamente, también existen prescripciones alemanas para la designación de los terminales de la caja de bornes de los motores de dos velocidades.

Dichos terminales se designan mediante una letra y un subíndice. La letra es U, V o W, según correspondan a la fase A, B o C, respectivamente. En cuanto al subíndice expresa el número de polos que el arrollamiento tiene cuando el terminal considerado se conecta a la red.

Para la explicación de las conexiones Dahlander nos ha parecido más conveniente emplear la notación P, M y F para los terminales. Sin embargo, la correspondencia es bien sencilla:

Prescindimos de los terminales F, que no van a la caja de bornes. Entonces los terminales P_A y M_C quedarán aquí designados por la letra U, con un subíndice. En el caso de P_A, el subíndice de la U será el del mayor número de polos, mientras que el subíndice de la U, para el caso de M_C, será el del menor número de polos. Análogamente, P_B y M_B equivalen ambos a la letra V, en el primer caso con el subíndice del mayor número de polos, y en el segundo caso con el subíndice del menor número de polos. Del mismo modo diríamos para P_C y M_A, que equivalen a la letra W.

Un ejemplo terminará por aclarar la cuestión. La figura 131 representa la disposición de la caja de bornes, para un motor de dos velocidades, según la conexión Dahlander, de acuerdo con la notación alemana. Se trata, así, de un motor con 8/4 polos. Comparando esta figura con la figura 128, se deducen fácilmente las equivalencias de notación.

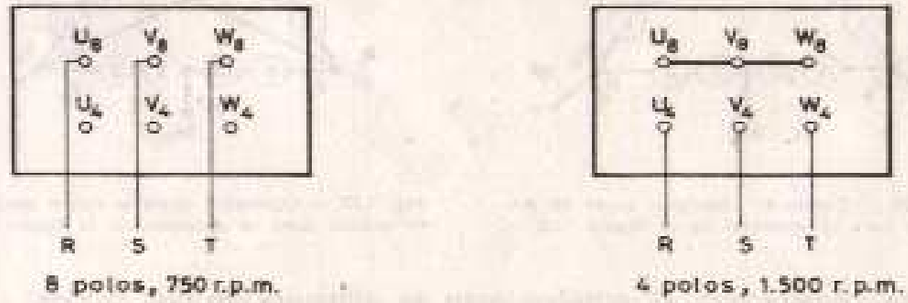


Fig. 131. — Designación usual y disposición correcta de los terminales de la caja de bornes, para motores de polos conmutables. Compárese con la figura 128.

11. Números de ranuras del estator y del rotor

Está comprobado por la práctica que los rotores en cortocircuito, con determinado número de ranuras, no arrancan, o bien arrancan difícilmente, o lo hacen con mucho ruido.

Hay muchas explicaciones teóricas diferentes para justificar estas dificultades del arranque, lo cual significa que todavía no se ha encontrado una única buena explicación.

Puesto que por ahora no es posible dar una fórmula única que esté de acuerdo con todas las opiniones teóricas, lo mejor es acogerse a datos prácticos experimentados por autores dignos de crédito.

Como es lógico, puesto que los motores de dos velocidades funcionan con dos polaridades diferentes, la relación de ranuras del estator al rotor deberá ser correcta para ambos números de polos.

La tabla 4, tomada de *Raskop*, reúne un conjunto de datos sobre las ranuras del rotor y estator, para diferentes números de polos, de motores trifásicos que no arrancan o lo hacen deficientemente.

Tabla 4. *Motores trifásicos (en jaula de ardilla) que no arrancan o arrancan mal (según Raskop)*

Número de polos	Número de ranuras		Arranque
	Estator	Rotor	
2	36	57	malo
4	24	25	malo
	24	27	regular
	24	28	malo
	24	41	»
	36	57	»
	48	43	»
	48	83	»
6	36	29	malo
	54	53	»
	36	66	no arranca

El profesor *Richter*, autor de probada categoría, recomienda las siguientes relaciones de ranuras:

— *Para motores de 2 polos:*

- Estator con 24 ranuras
  Rotor con: 10, 12, 16, 22, 24, 26, 28, 34 ranuras.
- Estator con 36 ó 48 ranuras
  Rotor con igual número de ranuras que el caso anterior. Deben evitarse los números de: 40, 46, 52 y 58 ranuras.

— *Para motores de 4 polos:*

- Estator con 24 ranuras
  Rotor con: 18, 30, 34, 38 ranuras.
- Estator con 36 ranuras
  Rotor con: 10, 14, 22, 26, 28, 30, 42, 46, 50, 54, 58 ranuras.
- Estator con 48 ranuras
  Rotor con: 18, 30, 34, 38, 42, 54, 58, 62, 66 ranuras.

— *Para motores de 6 polos:*

- Estator con 36 ranuras
  Rotor con: 20, 22, 26, 27, 28, 32, 34, 40, 44, 50, 51, 52, 56, 57, 58 ranuras.
- Estator con 54 ranuras
  Rotor con: 22, 26, 32, 33, 34, 38, 39, 40, 44, 45, 46, 50, 56, 58, 62, 63, 64, 68, 69, 70, 74, 75, 76 ranuras.
- Estator con 72 ranuras
  Rotor con: 26, 27, 28, 32, 34, 38, 40, 44, 45, 46, 50, 51, 56, 57, 58, 62, 63, 64, 68, 70, 74, 76, 80, 81, 82, 86, 88, 92, 93, 94, 98, 99 ranuras.

— *Para motores de 8 polos:*

- Estator con 36 ranuras
  Rotor con 48 ranuras (e inclinadas).
- Estator con 48 ranuras
  Rotor con: 60, 72 (e inclinadas).
- Estator con 72 ranuras
  Rotor con: 84, 96 ranuras (e inclinadas).

Por último, se ha expuesto la tabla 5, tomada de la revista alemana *ETZ* (Organo Oficial de la Asociación Electrotécnica Alemana), que reúne asimismo diferentes casos de ranuras del rotor y estator, para distintos casos de número de polos. Aquí se especifica más, ya que se indica la necesidad o no de utilizar ranuras inclinadas en el rotor, o de emplear bobinas de paso acortado, en el arrollamiento del estator; se dan también una serie de rotores no aconsejables.

Tabla 5. *Elección del número de ranuras, para rotores en jaula de ardilla: 2p = 4 (según ETZ):*

N.° ranuras del estator	Favorables	NUMERO DE RANURAS DEL ROTOR		Malos
		Posibles con inclinación	Posibles con paso acort.	
24	18, 22, 30, 34	20, 32	28	26, 24, 36
36	32, 44	30, 34, 42, 46	28, 40	26, 24, 38, 36, 48, 50, 60
48	34, 42, 58, 66	44, 46, 54, 56	40, 52, 64	36, 38, 48, 50, 60, 62, 72
60	42, 62	44, 46, 54, 56, 58, 66, 68, 70, 78, 80	52, 64, 76	48, 50, 60, 62, 72, 74, 84
72	—	54, 56, 58, 66, 68, 70, 78, 86, 82, 90, 92, 94	52, 64, 76, 88	50, 60, 72, 74, 62, 84, 86, 96, 98, 108
84	58, 114	66, 68, 70, 78, 80, 82, 90, 92, 94, 102, 104, 106	64, 76, 88, 100, 112	60, 62, 72, 74, 86, 84, 96, 98, 108, 110, 120
96	66, 82, 114, 130	68, 70, 78, 80, 90, 92, 94, 102, 104, 106, 116, 118, 126, 128	76, 88, 100, 112, 124	72, 74, 84, 86, 96, 98, 106, 110, 120, 122, 132
Para otro número de polos: Multiplicar los anteriores números de ranuras por $p/2$.				

Creemos que, con lo expuesto, se pueden obtener conclusiones prácticas acertadas. El lector observará que en las tres series de datos reunidos (de *Raskop*, de *Richter*, de *ETZ*) existen algunas divergencias. Por ejemplo, mientras *Richter* da como conveniente para un motor de cuatro polos, utilizar un estator de 36 ranuras y un rotor de 26, los datos de la tabla 5 lo desaconsejan.

No hay que olvidar que, aunque sea correcta la elección de la relación de ranuras del rotor y el estator, para cada número de polos, y a pesar de utilizar rotores con ranuras inclinadas respecto al eje axial, y de emplear bobinas de paso acortado en el estator, un motor de jaula de ardilla no arrancará, o lo hará defectuosamente, si la resistencia de los anillos de cortocircuito es demasiado pequeña.

Como la resistencia eléctrica de un conductor es función de la temperatura, se han dado casos de motores que no arrancaban bien en invierno y, en cambio, por la elevación de la temperatura, esto es, de la resistencia de los anillos en cortocircuito, arrancaban sin dificultad en verano.

Siempre que sea necesario aumentar la resistencia de los anillos en cortocircuito, se deberán tornear éstos (para suprimir material) desde *dentro afuera*, es decir, aumentando el diámetro interior de los anillos.

12. Potencia y momento de giro, en motores de dos velocidades

Debido a diversas causas (por ejemplo, al bajo factor de potencia), los motores de dos velocidades rinden menor potencia que los motores normales de dimensiones comparables. Sin embargo, esta desventaja queda superada por el interés que para la industria (por ejemplo, para las máquinas-herramienta) tiene el poder disponer de dos velocidades diferentes con un solo motor.

Cuando en los motores de dos velocidades se emplea la conexión Dahlander triángulo-doble estrella ($\triangle/\curlyvee\curlyvee$) se obtiene, aproximadamente, el mismo momento de giro para las dos velocidades. La potencia del motor, sin embargo, es mayor para la velocidad mayor (menor número de polos), de modo que se encuentra una relación de potencias que oscila entre 1,3 y 1,8.

Cuando la conexión empleada es la de estrella-doble estrella ($\curlyvee/\curlyvee\curlyvee$) entonces el momento de giro crece según el cuadrado de la velocidad, aproximadamente. Esta conexión es la empleada, pues, para bombas y compresores rotativos.

También es posible obtener una conexión para arrollamientos Dahlander, que desarrolle aproximadamente la misma potencia para las dos velocidades. Se ejecuta entonces la conexión llamada doble estrella-triángulo, que solamente citamos, por ser de menor interés práctico.

SEGUNDA PARTE

I. Arrollamientos enteros

II. Arrollamientos fraccionarios

III. Arrollamientos mixtos trifásicos

IV. Arrollamientos trifásicos para dos velocidades

V. Tablas y esquemas de conexiones

I. ARROLLAMIENTOS ENTEROS

Arrollamientos enteros son aquellos en los que el número q de ranuras por polo y fase ($q = N/2pm$) es un número entero.

Los esquemas que se presentan a continuación incluyen numerosos arrollamientos posibles para máquinas trifásicas con ranuras desde $N = 12$ hasta $N = 39$, y para un número total de polos desde $2p = 2$ hasta $2p = 8$. Delante de cada conjunto de planes de arrollamientos posibles para unos determinados valores de N, $2p$ y m, se ha dibujado la correspondiente estrella de ranuras, con la distribución de rayos, lo que proporciona la situación exacta de los lados de bobinas de cada fase, y el sentido de la corriente en dichos lados.

Asimismo se ha analizado, de acuerdo con lo expuesto en el capítulo X, la posibilidad de ejecución de arrollamientos a una y a dos capas.

El lector comprobará fácilmente que en los arrollamientos enteros se puede prescindir del método de la estrella de ranuras, ya que los lados de bobinas están siempre distribuidos del modo siguiente:

— Primero q lados de bobinas de la fase A (corriente hacia arriba).
— A continuación, q lados de bobinas de la fase C (corriente hacia abajo).
— Después, q lados de bobinas de la fase B (corriente hacia arriba).
— Seguidamente, q lados de bobinas de la fase A (corriente hacia abajo), y así sucesivamente, repitiéndose lo expuesto hasta completar todas las ranuras de la máquina.

Sin embargo, para ejercitarse en el método de la estrella de ranuras, conviene primero aplicarlo a estos casos con q = número entero, pues por ser los más sencillos servirán de entrenamiento para dominar el método y poderlo aplicar con éxito en casos más complicados.

Para cada caso particular de valores de N, $2p$ y m, se han dibujado los arrollamientos posibles, o los más frecuentemente utilizados, a una y a dos capas, con bobinas iguales o con bobinas concéntricas.

El haber incluido algunos dibujos de arrollamientos a una capa, dispuestos en dos planos, con un grupo de bobinas curvadas (bobinas cojas) no implica que sea necesario curvar dichas bobinas cuando se utiliza como conductor hilo esmaltado.

Asimismo, en la disposición de las cabezas de bobinas en dos y tres planos, no se quiere indicar ni la forma ni las dimensiones de las cabezas de bobinas. El haber dibujado éstas de tamaños diferentes sólo es para facilitar su posición al lector. Trabajando con hilo esmaltado, todos los grupos de bobinas pueden ser iguales en tamaño, y se pueden disponer las fases unas sobre otras, ordenadamente (1.ª fase, 2.ª fase, 3.ª fase), o solapar las bobinas o grupos.

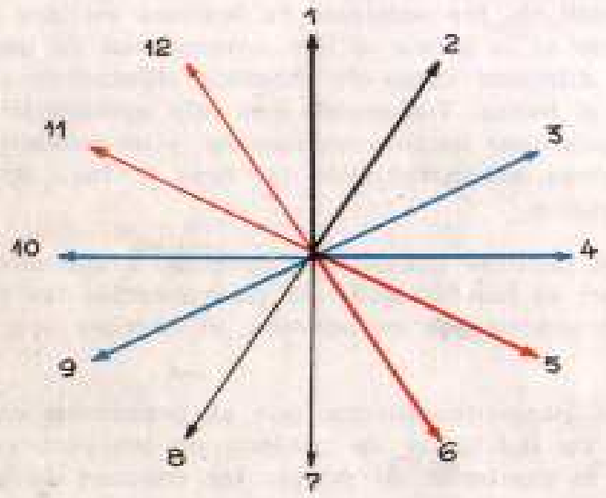
Las bobinas dibujadas con cabezas trapeciales tampoco pretenden sugerir algo nuevo al bobinsdor; se han dibujado así para mostrar las diferencias de situación de los cruzamientos de bobinas, al escoger una u otra forma para las cabezas.

En resumen, los esquemas de arrollamientos que se presentan expresan exactamente la situación de los lados de bobinas en las ranuras, y el sentido de circulación de la corriente. Al dibujar las cabezas de bobinas se indica con ello el paso ejecutado y, en consecuencia, si se trata de bobinas iguales o concéntricas; pero la forma exacta y la colocación de las cabezas de bobinas en la máquina deben ser decididas de acuerdo con el sistema de bobinado del taller, y de acuerdo también con las particulares conveniencias (útiles de bobinar, especialización de la mano de obra, tipo de fabricación: en serie o especial, etc.).

Todas las conexiones dibujadas en los arrollamientos son en serie. Si se desean ejecutar conexiones en paralelo, se pueden consultar las tablas y esquemas que se exponen a partir de la página 208. Sobre la posibilidad de efectuar conexiones en paralelo, hay que atender a lo expresado en el capítulo XI.

El paso del devanado, en cuanto a posibilidad de ejecución se refiere, se puede escoger a voluntad en todos los arrollamientos a dos capas; sin embargo, por razones eléctricas, hay que atender a las orientaciones dadas en el capítulo V de la 3.ª Parte.

N = 12
P = 1



$q = N/2pm = 12/6 = 2$ A. entero

$t = 1$, $N/t = 12$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360t/N = 360/12 = 30°$ $\beta = 360p/N = 360/12 = 30°$

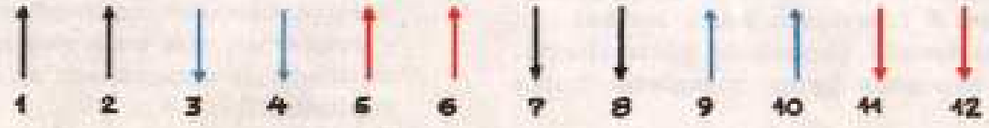
$N/3 = 12/3 = 4$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 2$ rayos positivos , $N/6 = 2$ rayos negativos

Condiciones de ejecución:
- A. a una capa: $N/2m = 12/6 = 2$, entero; $N/tm = 12/3 = 4$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 4$, entero

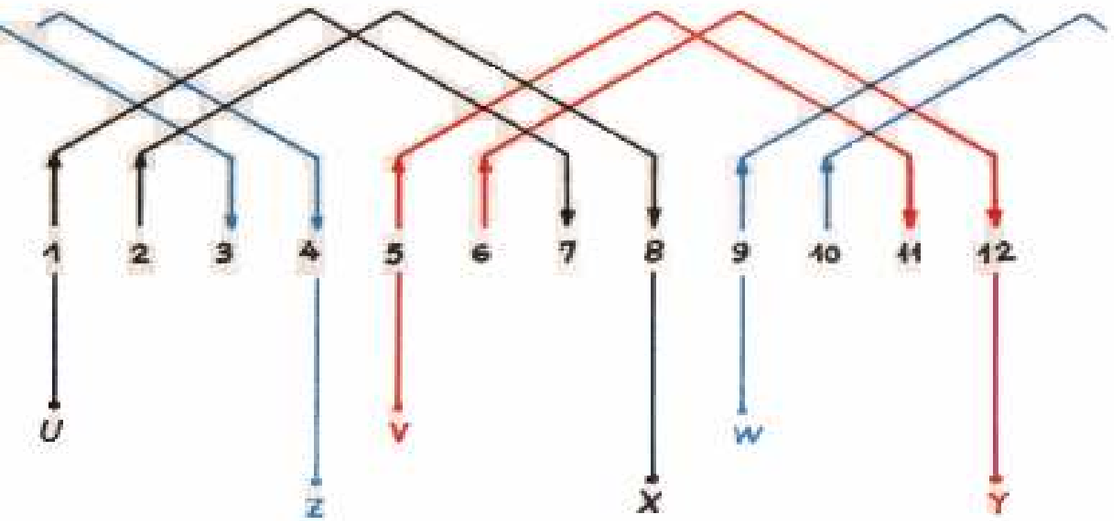
Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento



12 ranuras , 2 polos

A. a una capa, con bobinas de paso constante

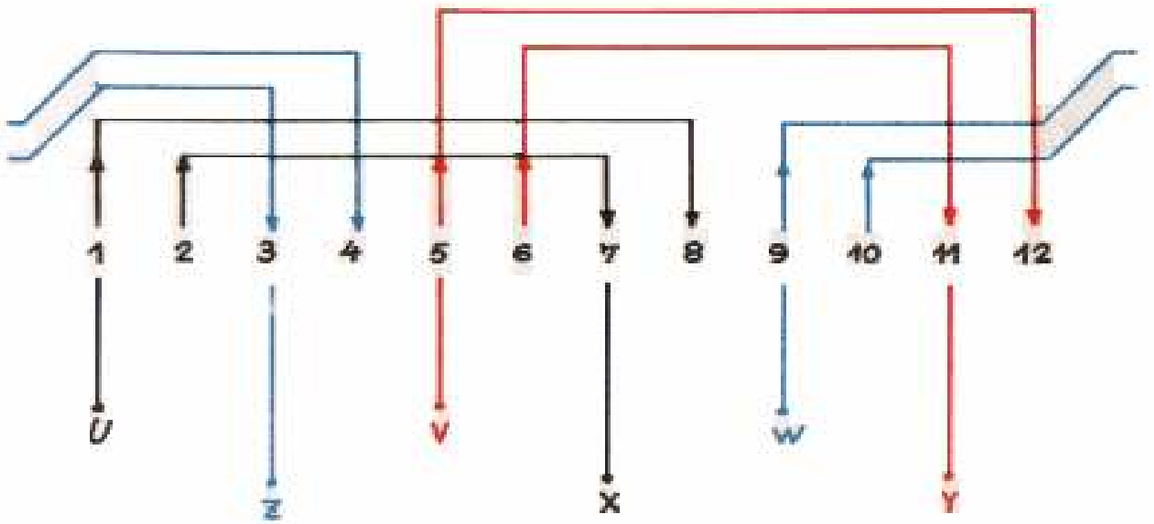


Por fase :

1 grupo de 2 bobinas. Paso: 1-7 (diam.)

Terminales: U=1 ; V=5 ; W=9
X=8 ; Y=12 ; Z=4

2) A. a una capa, con bobinas de paso variable y cabezas en 2 planos



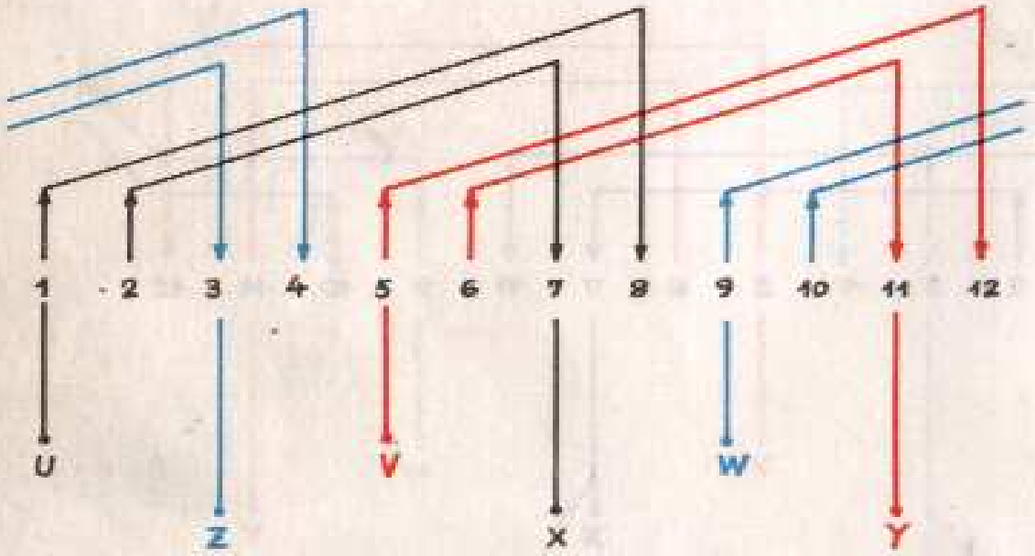
Por fase:

1 grupo de 2 bobinas. Paso : 1-6-8 (diam.)

Terminales : U=1 ; V=6 ; W=9
X=7 ; Y=11 ; Z=3

12 ranuras , 2 polos

3) A. a una capa, con bobinas de paso variable y forma trapecial

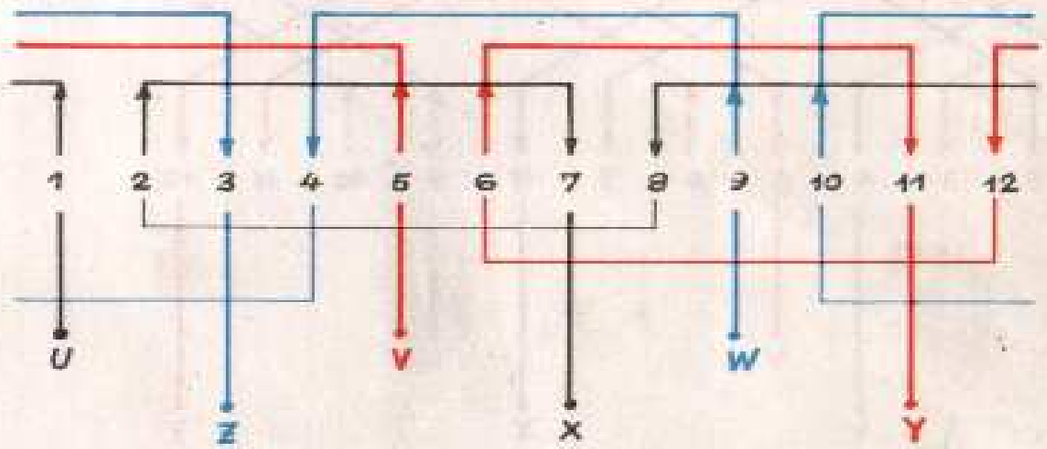


Por fase:

1 grupo de 2 bobinas . Paso: 1-6-8 (diam.)

Terminales: U = 1 ; V = 5 ; W = 9
X = 7 ; Y = 11 ; Z = 3

4) A. a una capa, con bobinas de paso constante y cabezas en 3 planos



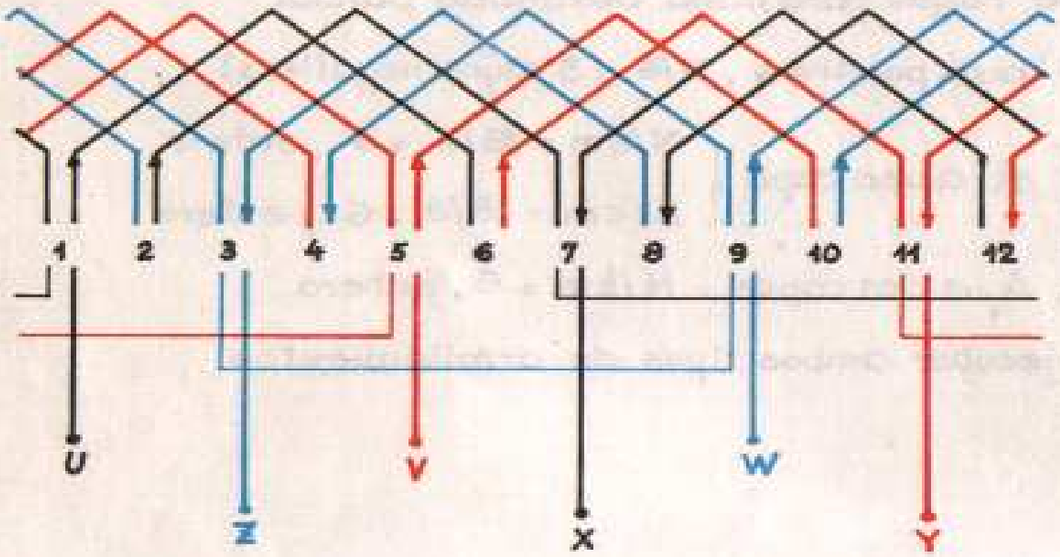
Por fase:

2 bobinas de paso 1-6

Terminales: U = 1 ; V = 5 ; W = 9
X = 7 ; Y = 11 ; Z = 3

12 ranuras , 2 polos

5) A. a dos capas, con paso acortado

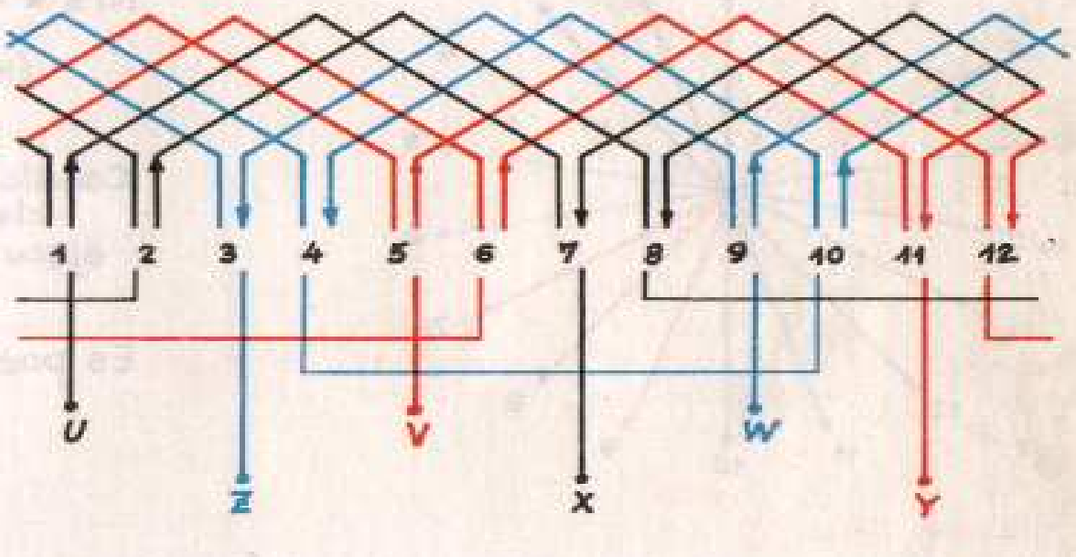


Por fase :

2 grupos de 2 bobinas . Paso : 1-6 (acort.)

Terminales: U = 1 ; V = 5 ; W = 9
X = 7 ; Y = 11 ; Z = 3

6) A. a dos capas, con paso diametral

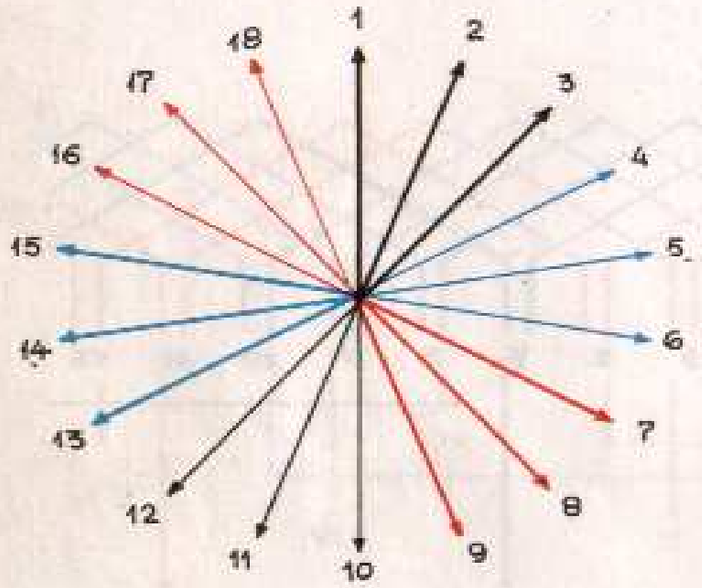


Por fase :

2 grupos de 2 bobinas . Paso : 1-7 (diam.)

Terminales : U = 1 ; V = 5 ; W = 9
X = 7 ; Y = 11 ; Z = 3

N = 18
P = 1



$q = N/2pm = 18/6 = 3$ A. entero

$t = 1$, $N/t = 18$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360t/N = 360/18 = 20°$ $\beta = 360p/N = 360/18 = 20°$

$N/3 = 18/3 = 6$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 3$ rayos positivos, $N/6 = 3$ rayos negativos)

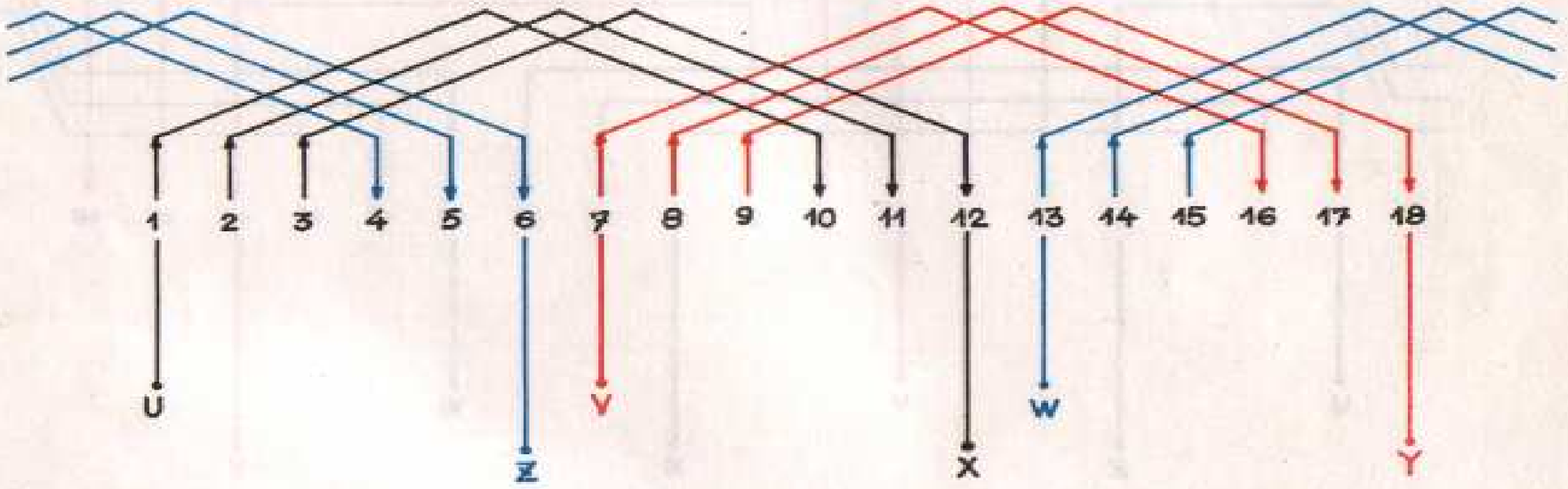
Condiciones de ejecución:
- A. a una capa:
  - $N/2m = 18/6 = 3$, entero
  - $N/tm = 18/3 = 6$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 6$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

18 ranuras , 2 polos

1) A. a una capa, con bobinas de paso constante



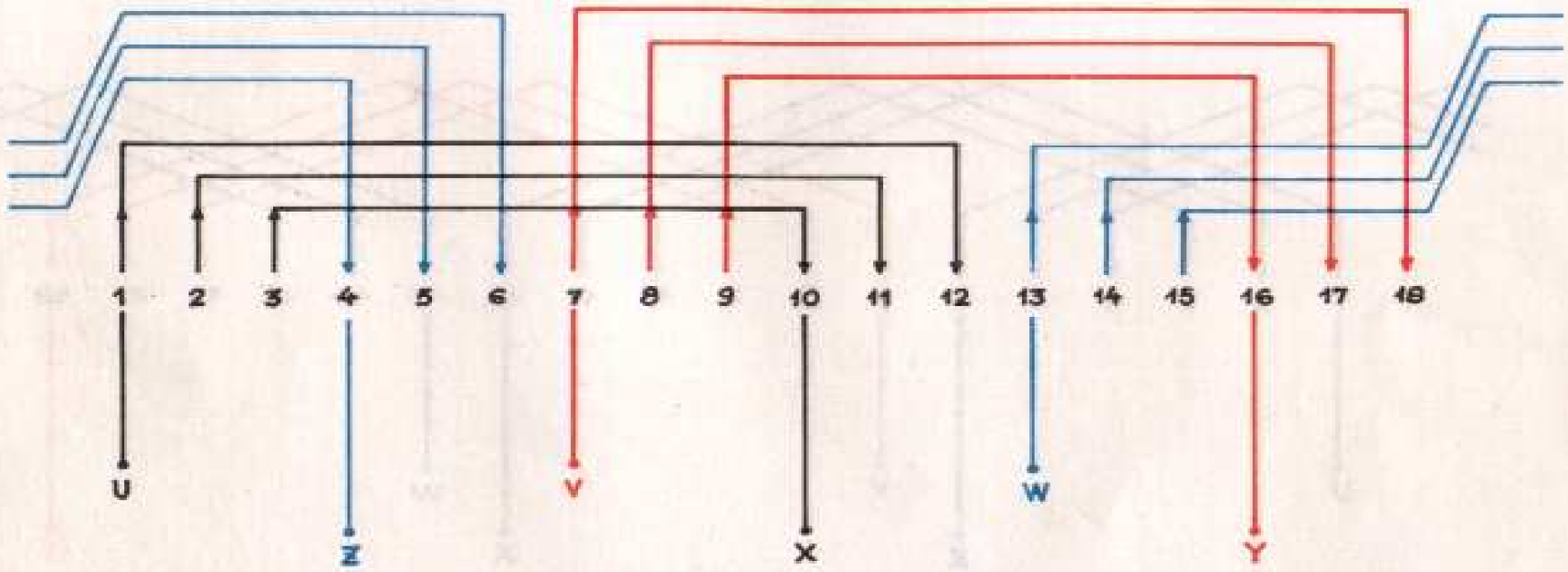
Por fase :

1 grupo de 3 bobinas . Paso : 1-10 (diam.)

Terminales : $U = 1$; $V = 7$; $W = 13$
$X = 12$; $Y = 18$; $Z = 6$

18 ranuras, 2 polos

2) A. a una capa, con bobinas de paso variable y cabezas en dos planos



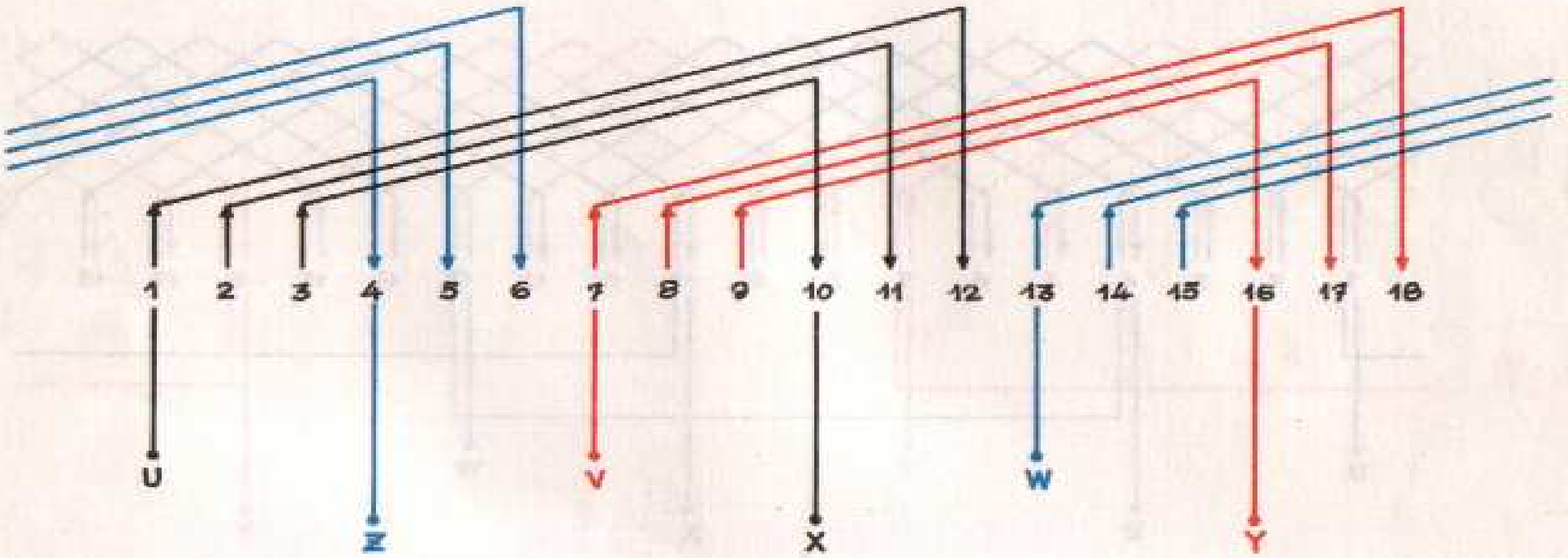
Por fase:

1 grupo de 3 bobinas. Paso: 1-8-10-12 (diam.)

Terminales: U = 1 ; V = 7 ; W = 13
X = 10 ; Y = 16 ; Z = 4

18 ranuras, 2 polos

3) A. a una capa, con bobinas de paso variable y de forma trapecial



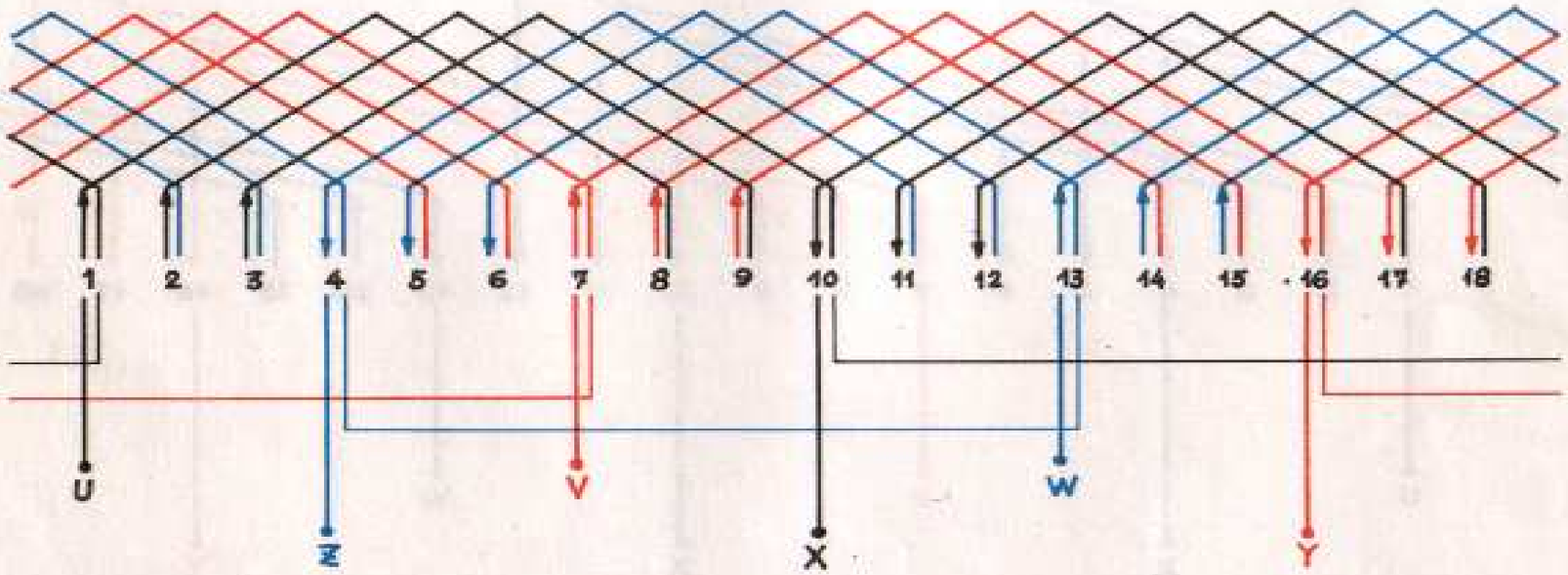
Por fase:

1 grupo de 3 bobinas. Paso: 1-8-10-12 (diam.)

Terminales: $U = 1$; $V = 7$; $W = 13$
$X = 10$; $Y = 16$; $Z = 4$

18 ranuras, 2 polos

4) A. a dos capas, con paso acortado en dos ranuras



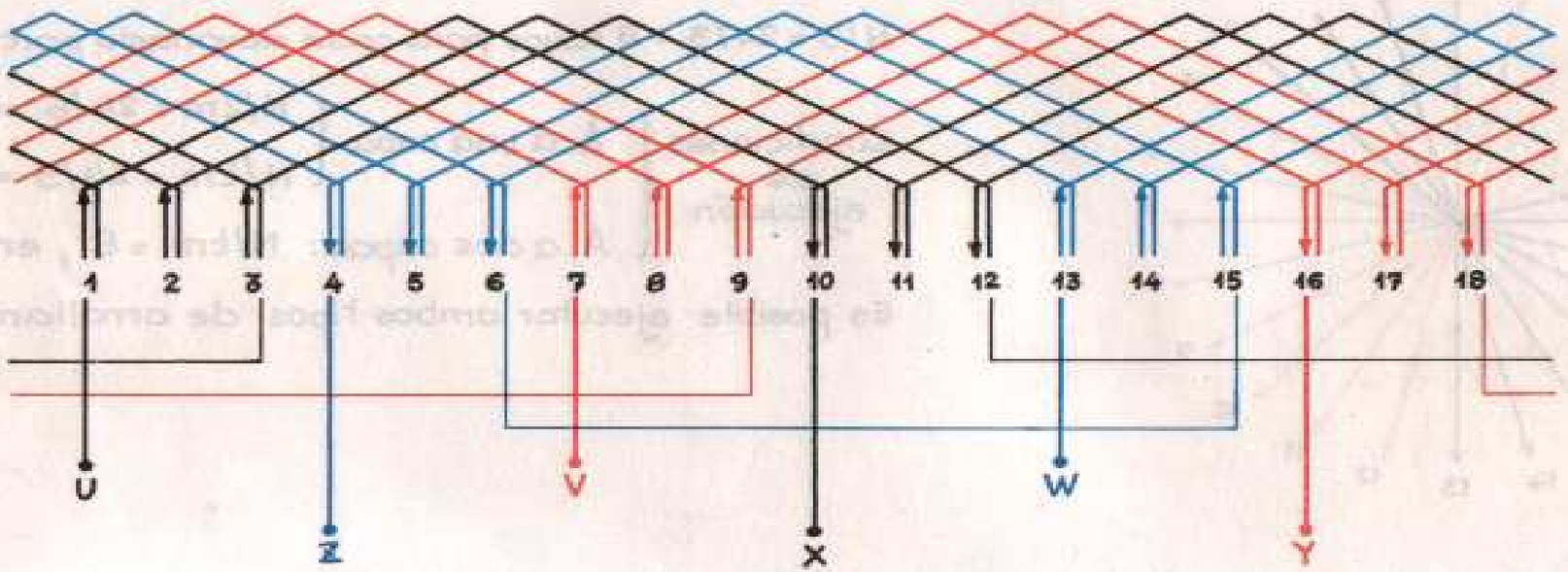
Por fase:

2 grupos de 3 bobinas. Paso: 1-8 (muy acort.)

Terminales: U = 1 ; V = 7 ; W = 13
X = 10 ; Y = 16 ; Z = 4

18 ranuras, 2 polos

5) A. a dos capas, con paso diametral

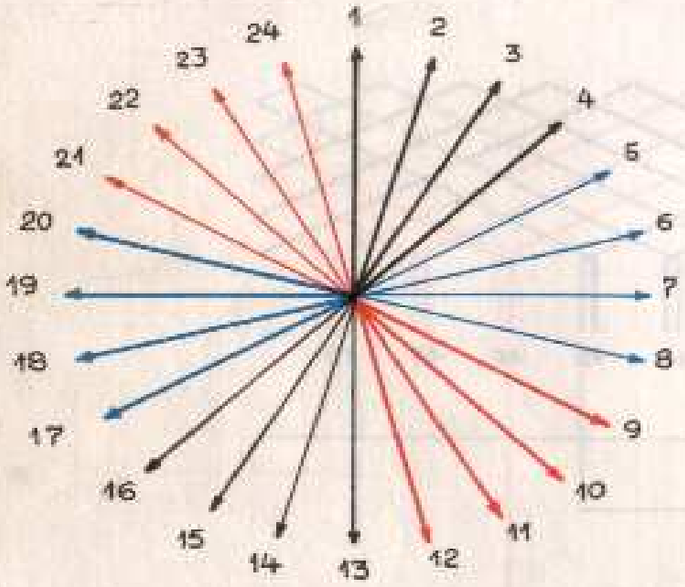


Por fase:

2 grupos de 3 bobinas . Paso : 1-10 (diam.)

Terminales : $U = 1$; $V = 7$; $W = 13$
$X = 10$; $Y = 16$; $Z = 4$

N = 24
p = 1



$q = N/2pm = 24/6 = 4$ A. entero

$t = 1$, $N/t = 24$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360/24 = 15°$ $\beta = 360\,p/N = 360/24 = 15°$

$N/3 = 24/3 = 8$ rayos para cada devanado parcial

Condiciones de ejecución:

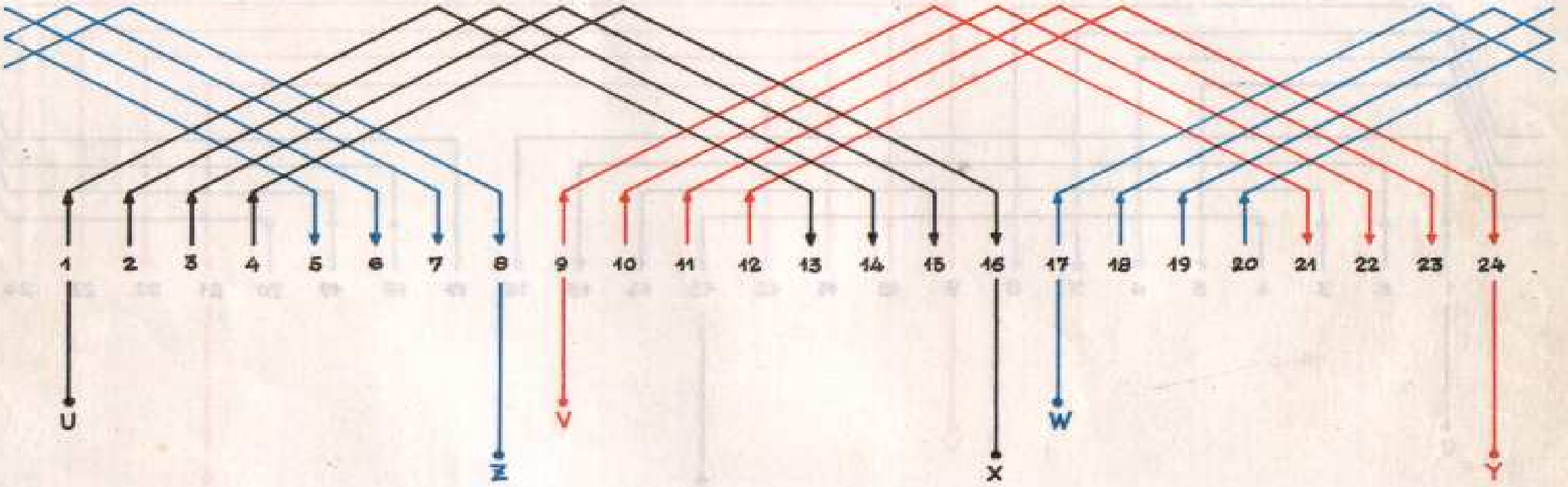
- A. a una capa:
  - $N/2m = 24/6 = 4$, entero
  - $N/tm = 24/3 = 8$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 8$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

24 ranuras, 2 polos

1) A. a una capa, con bobinas de paso constante



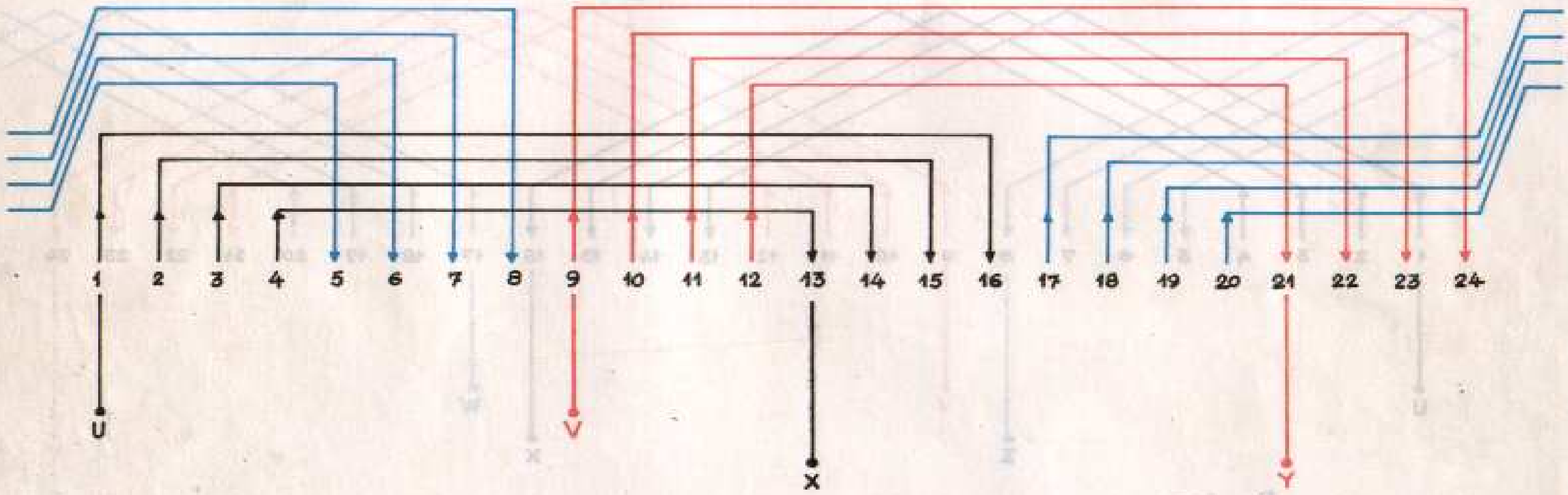
Por fase:

1 grupo de 4 bobinas. Paso: 1-13 (diam.)

Terminales: $U=1$; $V=9$; $W=17$
$X=16$; $Y=24$; $Z=8$

24 ranuras, 2 polos

2) A. a una capa, con bobinas de paso variable y cabezas en dos planos



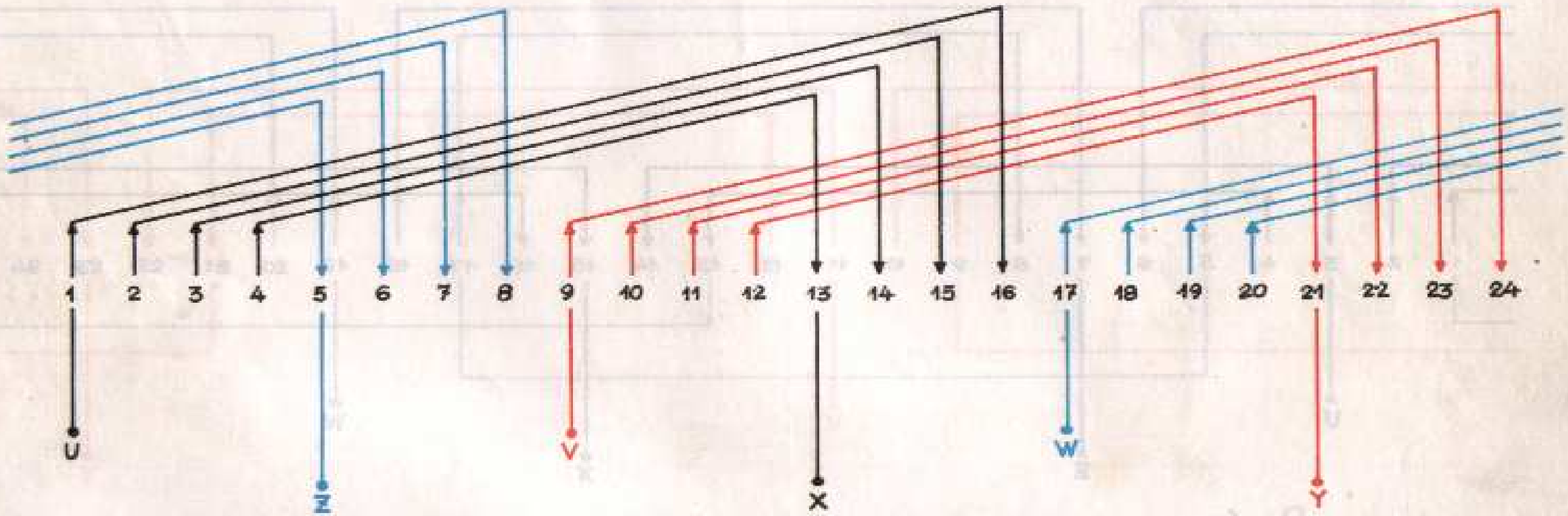
Por fase:

1 grupo de 4 bobinas. Paso: 1-10-12-14-16 (diam.)

Terminales: U = 1 ; V = 9 ; W = 17
X = 13 ; Y = 21 ; Z = 5

24 ranuras, 2 polos

3) A. a una capa, con bobinas de paso variable y forma trapecial



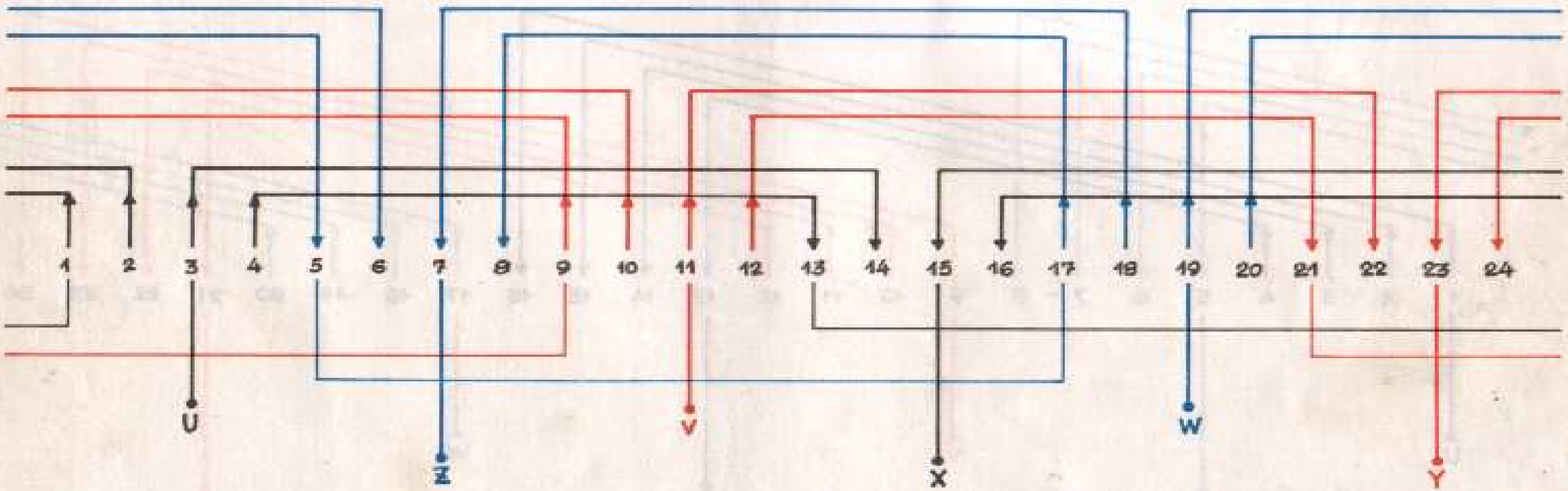
Por fase:

1 grupo de 4 bobinas. Paso: 1-10-12-14-16 (diam.)

Terminales: U = 1 ; V = 9 ; W = 17
X = 13 ; Y = 21 ; Z = 5

24 ranuras, 2 polos

4) A. a una capa, con bobinas de paso variable y cabezas en tres planos



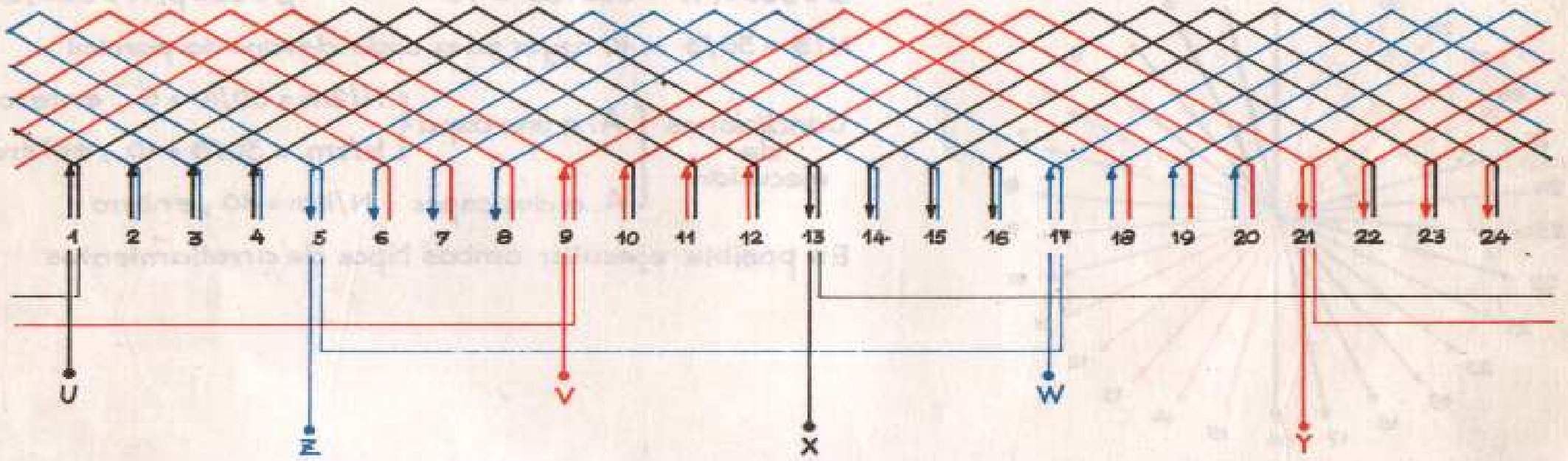
Por fase:

2 grupos de 2 bobinas . Paso: 1-10-12

Terminales : $U = 3$; $V = 11$; $W = 19$
$X = 15$; $Y = 23$; $Z = 7$

24 ranuras, 2 polos

5) A. a dos capas, con paso acortado en tres ranuras

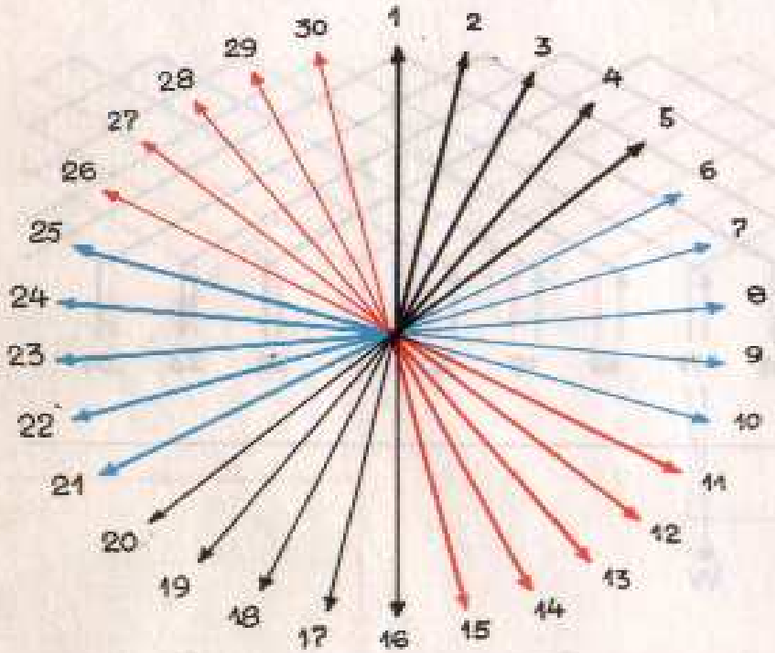


Por fase:

2 grupos de 4 bobinas. Paso: 1-10 (acort.)

Terminales: U = 1 ; V = 9 ; W = 17
X = 13; Y = 21; Z = 5

N = 30
P = 1



$q = N/2pm = 30/6 = 5$ A. entero

$t = 1$, $N/t = 30$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360/30 = 12°$ $\beta = 360\,p/N = 360/30 = 12°$

$N/3 = 30/3 = 10$ rayos para cada devanado parcial

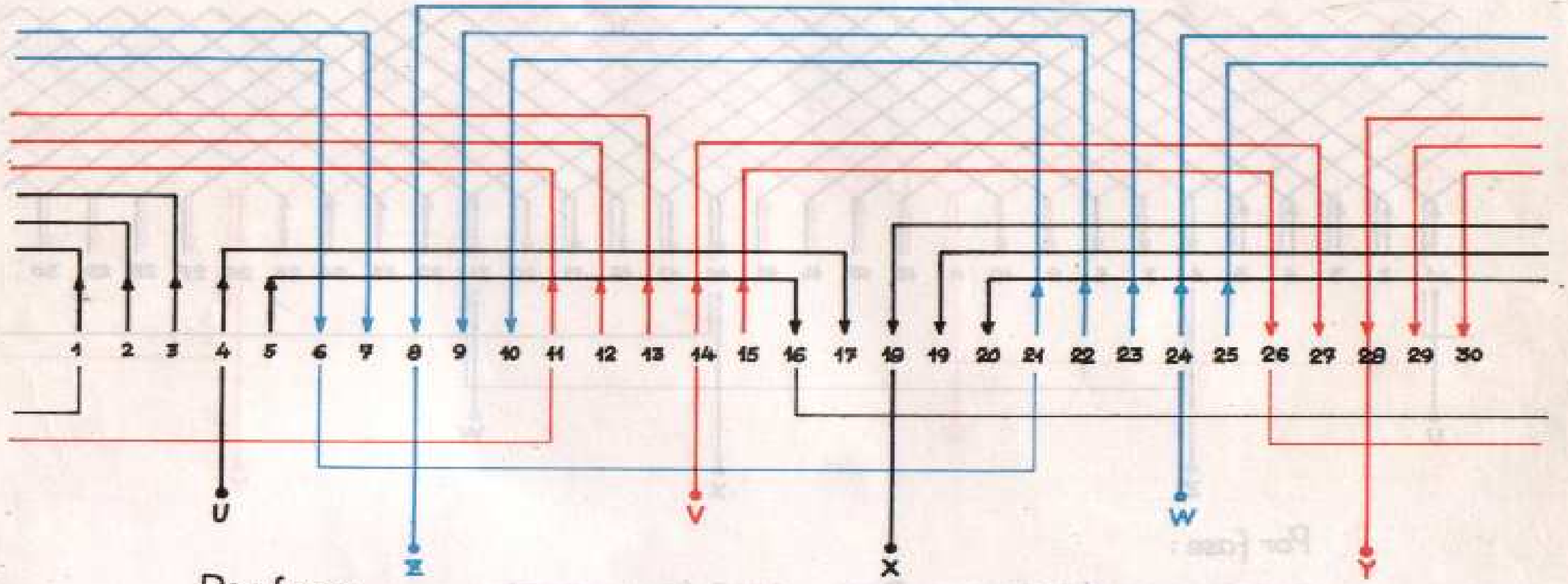
Condiciones de ejecución:
- A. a una capa:
  - $N/2m = 30/6 = 5$, entero
  - $N/tm = 30/3 = 10$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 10$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

30 ranuras, 2 polos

1) A. a una capa, con bobinas de paso variable y cabezas en tres planos



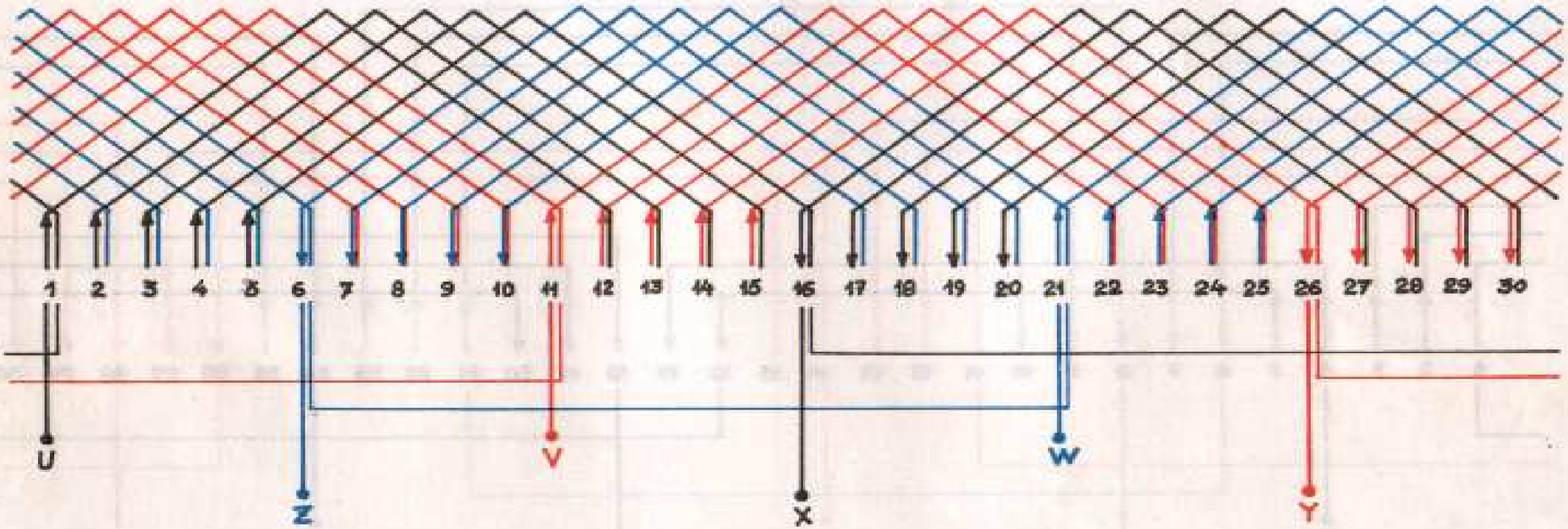
Por fase:

2 grupos de 2 y de 3 bobinas. Paso: 1-12-14 y 1-12-14-16, respect.

Terminales: $U=4$; $V=14$; $W=24$
$X=18$; $Y=28$; $Z=8$

30 ranuras, 2 polos

2) A. a dos capas, con paso acortado en cuatro ranuras



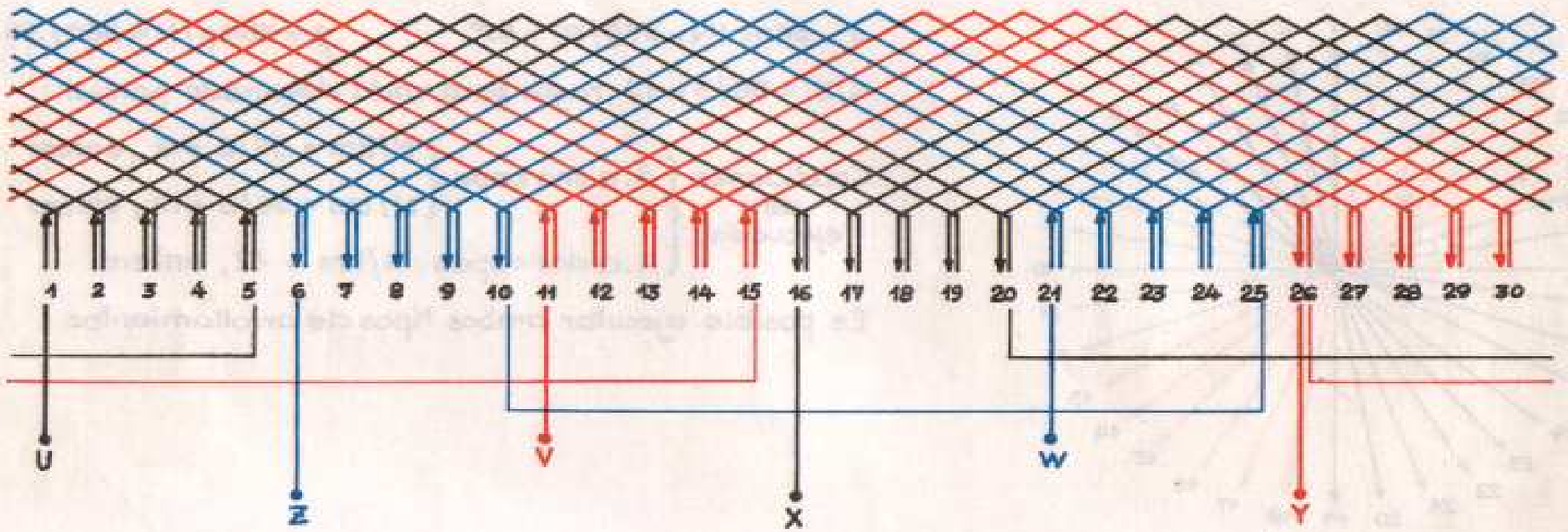
Por fase:

2 grupos de 5 bobinas. Paso: 1-12 (muy acort.)

Terminales: U = 1 ; V = 11 ; W = 21
X = 16 ; Y = 26 ; Z = 6

30 ranuras, 2 polos

3) A. a dos capas, con paso diametral

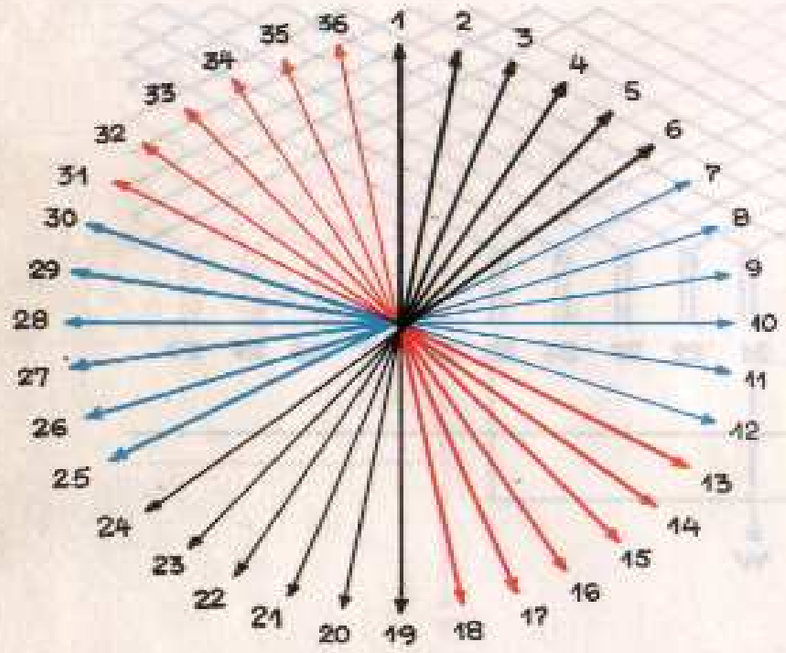


Por fase:

2 grupos de 5 bobinas. Paso: 1-16 (diam.)

Terminales: $U = 1$; $V = 11$; $W = 21$
$X = 16$; $Y = 26$; $Z = 6$

N = 36
p = 1



$q = N/2pm = 36/6 = 6$ A. entero

$t = 1$, $N/t = 36$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360t/N = 360/36 = 10°$ $\beta = 360p/N = 360/36 = 10°$

$N/3 = 36/3 = 12$ rayos para cada devanado parcial

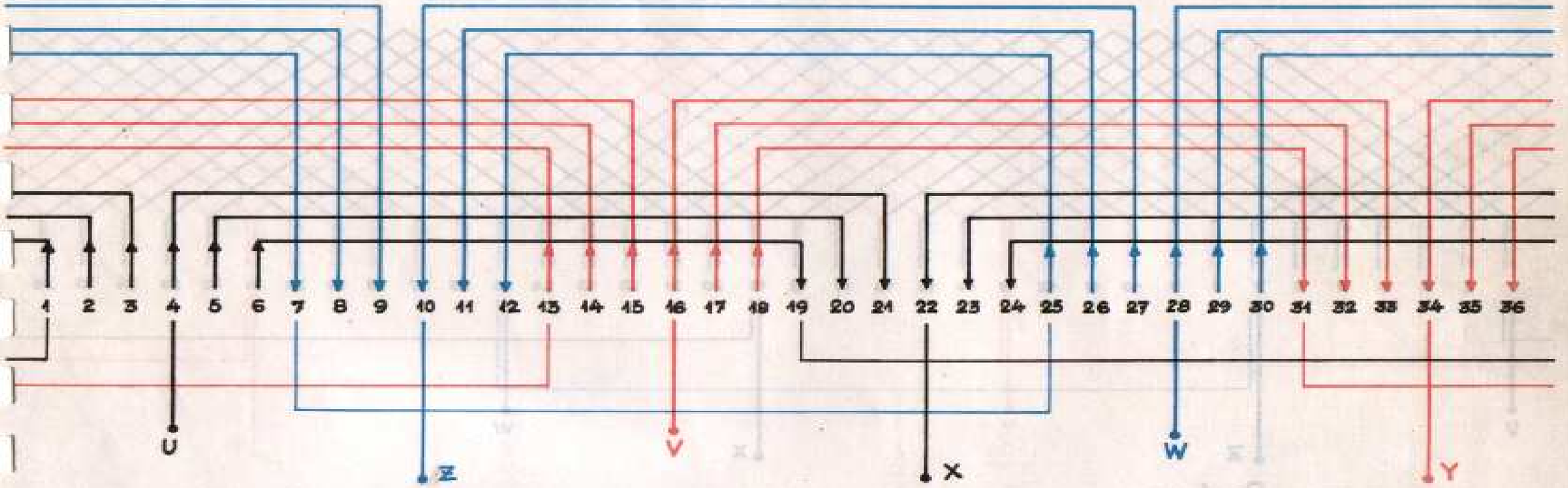
Condiciones de ejecución:
- A. a una capa:
  - $N/2m = 36/6 = 6$, entero
  - $N/tm = 36/3 = 12$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 12$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

36 ranuras, 2 polos

1) A. a una capa, con bobinas de paso variable y cabezas en tres planos



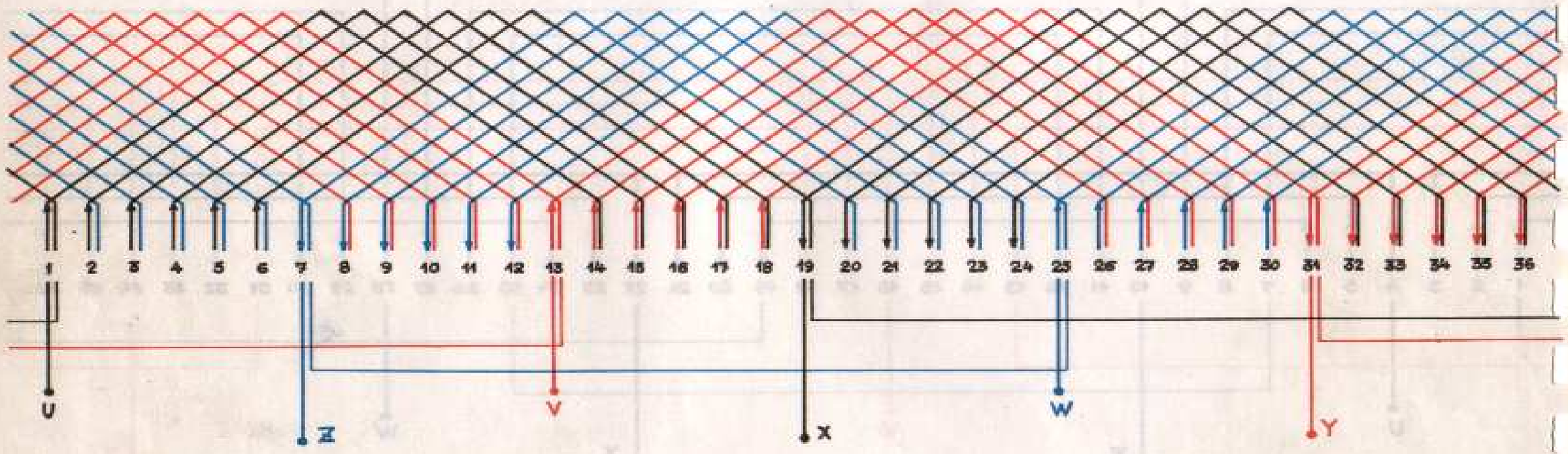
Por fase :

2 grupos de 3 bobinas . Paso : 1-14-16-18

Terminales : U = 4 ; V = 16 ; W = 28
X = 22 ; Y = 34 ; Z = 10

36 ranuras, 2 polos

2) A. a dos capas, con paso acortado en cinco ranuras



Por fase:

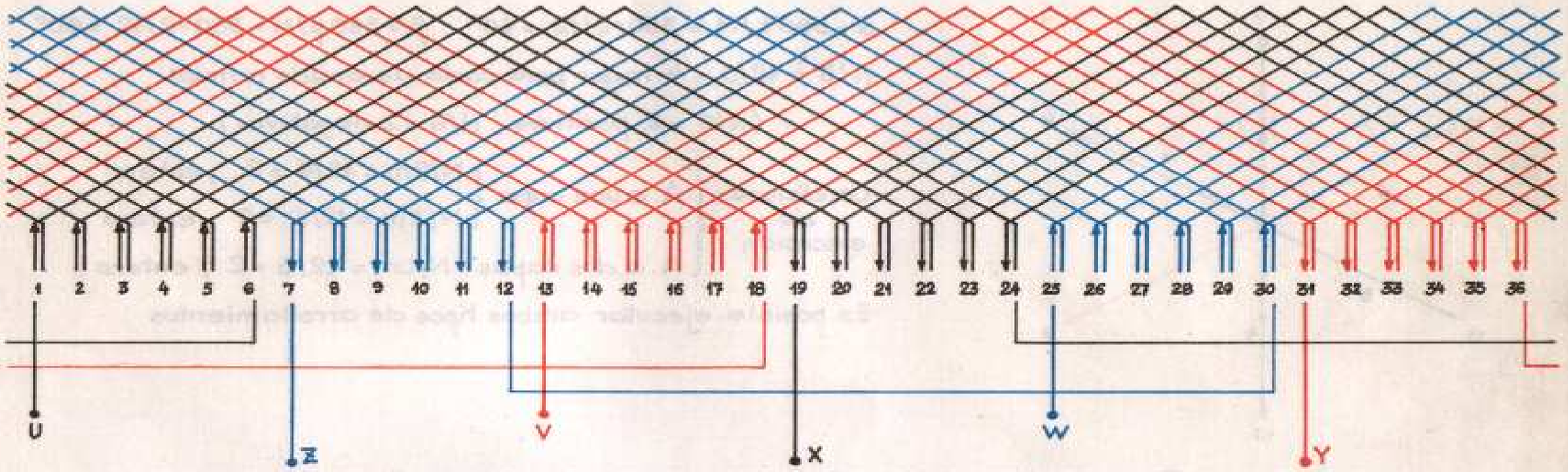
2 grupos de 6 bobinas. Paso: 1-14 (muy acort.)

Terminales: U = 1 ; V = 13 ; W = 25
X = 19 ; Y = 31 ; Z = 7

"Seglo-Pandrau"

36 ranuras, 2 polos

3) A. a dos capas, con paso diametral

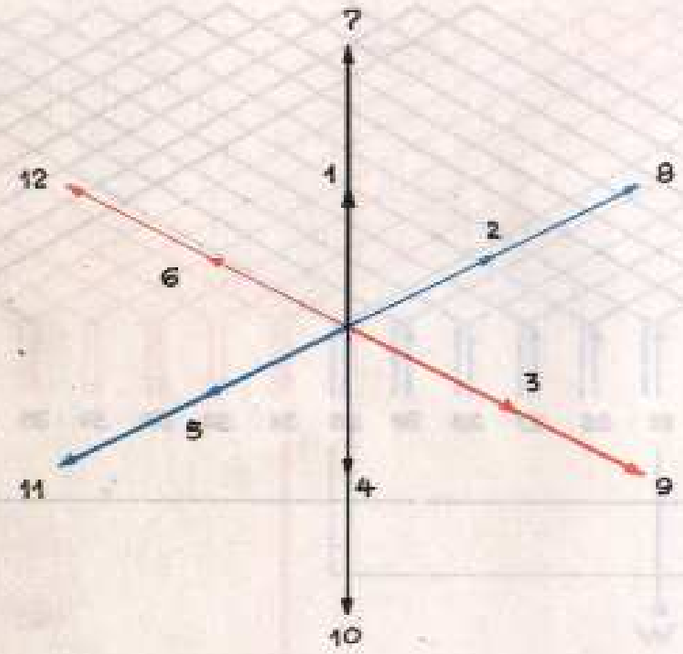


Por fase:

2 grupos de 6 bobinas. Paso: 1-19 (diam.)

Terminales: U = 1 ; V = 13 ; W = 25
X = 19 ; Y = 31 ; Z = 7

N = 12
p = 2



$q = N/2pm = 12/12 = 1$ A. entero

$t = 2$, $N/t = 12/2 = 6$ rayas no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360 \times 2/12 = 60°$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 2/12 = 60°$

$N/3 = 12/3 = 4$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 2$ positivos , $N/6 = 2$ negativos)

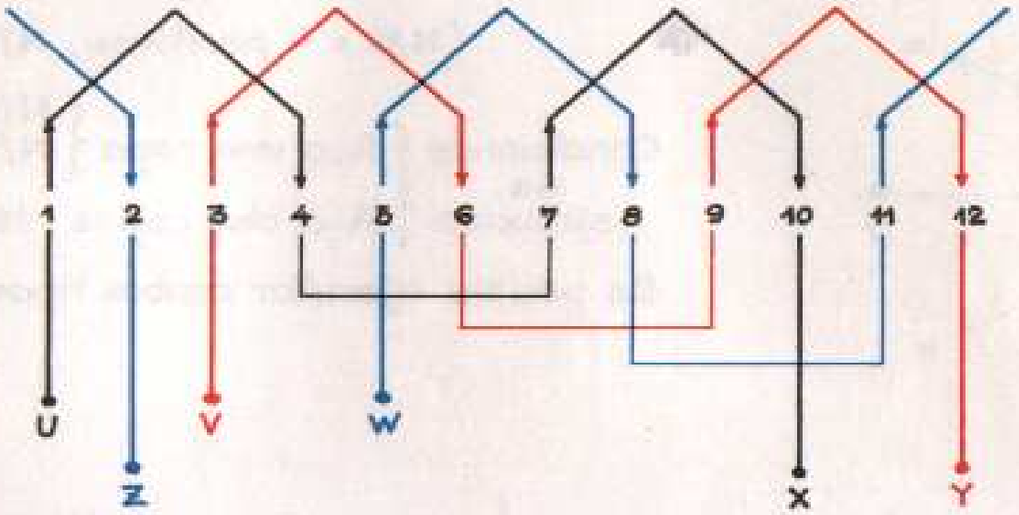
Condiciones de ejecución:
- A. a una capa:
  - $N/2m = 12/6 = 2$, entero
  - $N/tm = 12/6 = 2$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 12/6 = 2$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

12 ranuras , 4 polos

1) A. a una capa , con bobinas de paso constante

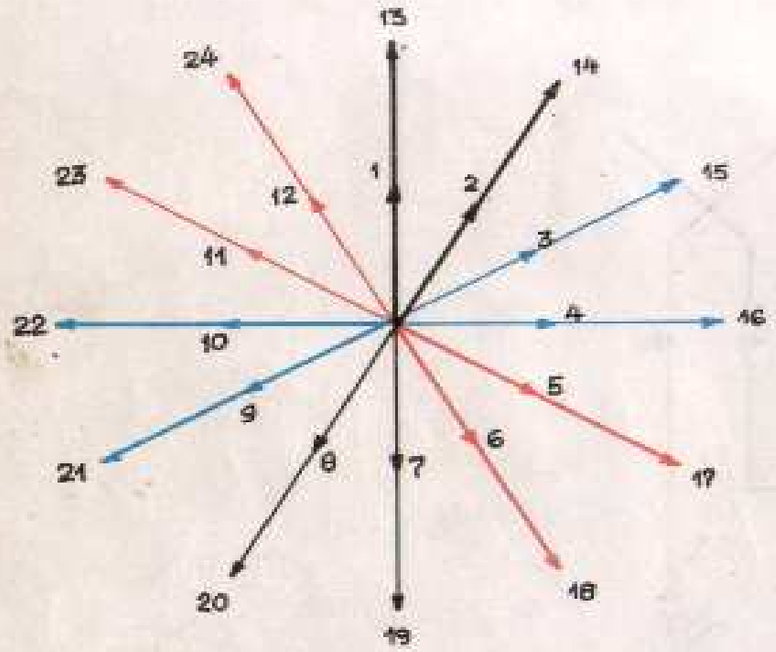


Por fase :

2 grupos de 1 bobina . Paso : 1-4 (diam.)

Terminales : U = 1 ; V = 3 ; W = 5
X = 10 ; Y = 12 ; Z = 2

N = 24
p = 2



$q = N/2pm = 24/12 = 2$ A. entero

$t = 2$, $N/t = 24/2 = 12$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360t/N = 360 \times 2/24 = 30°$, $\beta = 360p/N = 360 \times 2/24 = 30°$

$N/3 = 24/3 = 8$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 4$ positivos, $N/6 = 4$ negativos)

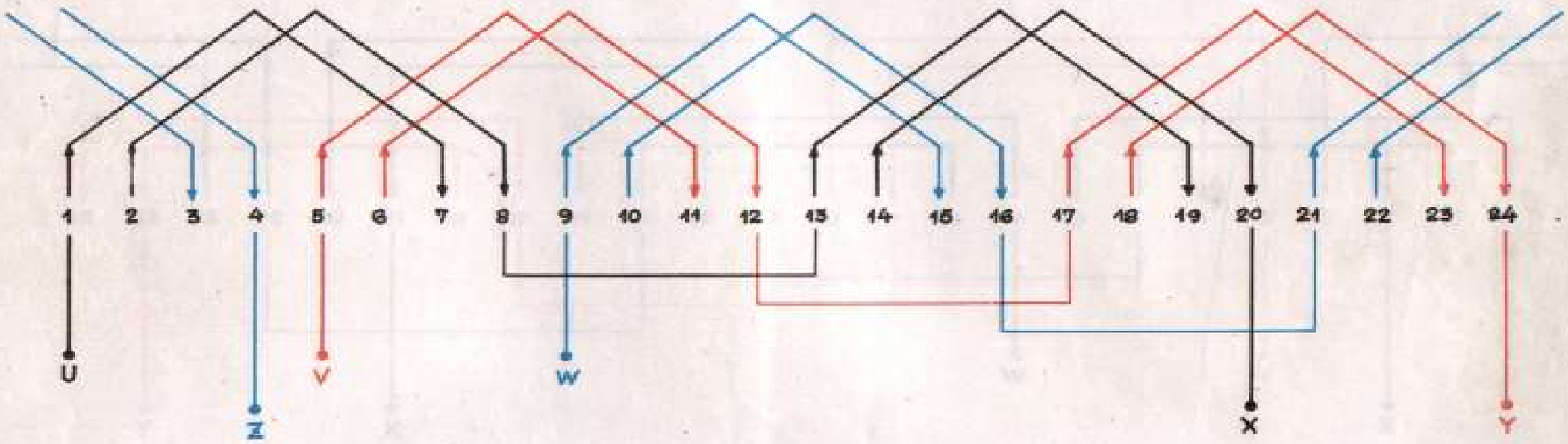
Condiciones de ejecución:
- A. a una capa: $N/2m = 24/6 = 4$, entero; $N/tm = 24/6 = 4$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 4$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

24 ranuras, 4 polos

1) A. a una capa, con bobinas de paso constante



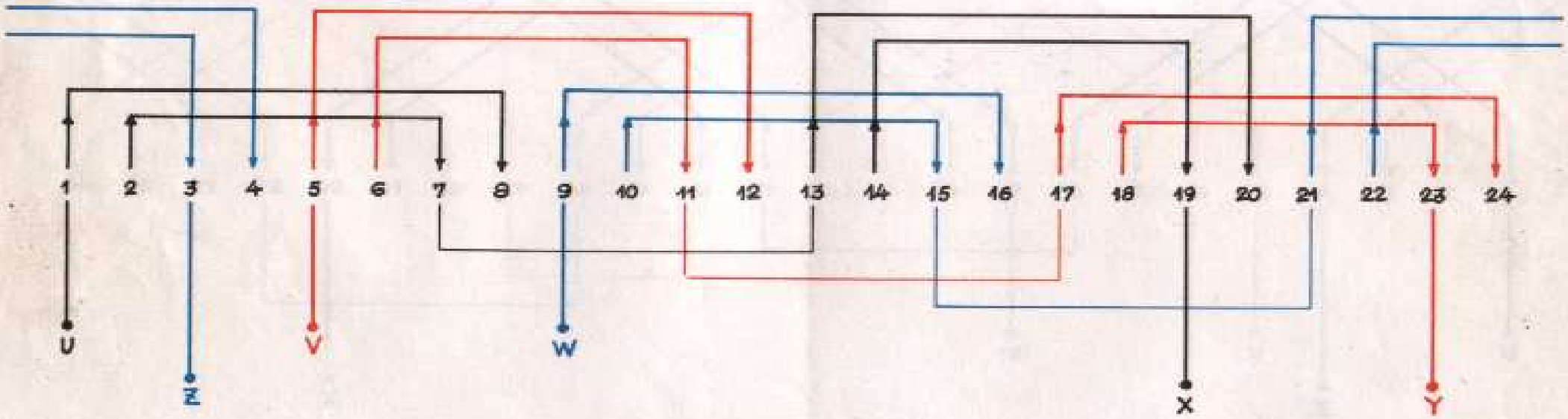
Por fase:

2 grupos de 2 bobinas. Paso: 1-7 (diam.)

Terminales: U = 1 ; V = 5 ; W = 9
X = 20 ; Y = 24 ; Z = 4

24 ranuras, 4 polos

2) A. a una capa, con bobinas de paso variable y cabezas en dos planos



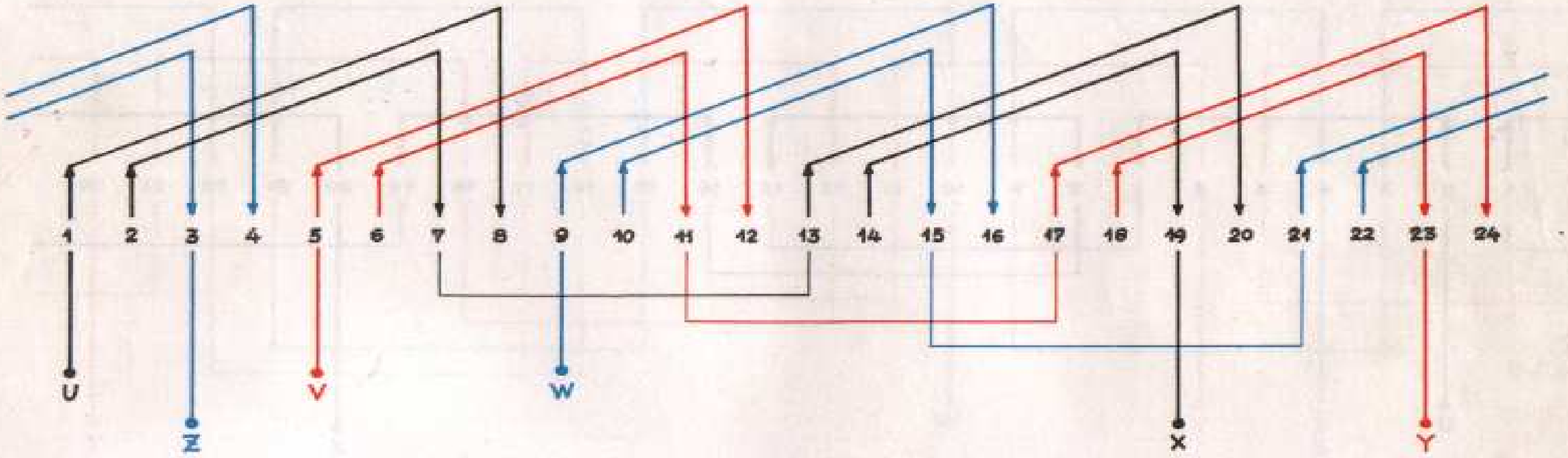
Por fase:

2 grupos de 2 bobinas. Paso: 1-6-8 (diam.)

Terminales: U = 1 ; V = 5 ; W = 9
X = 19 ; Y = 23 ; Z = 3

24 ranuras , 4 polos

3) A. a una capa , con bobinas de paso variable y forma trapecial



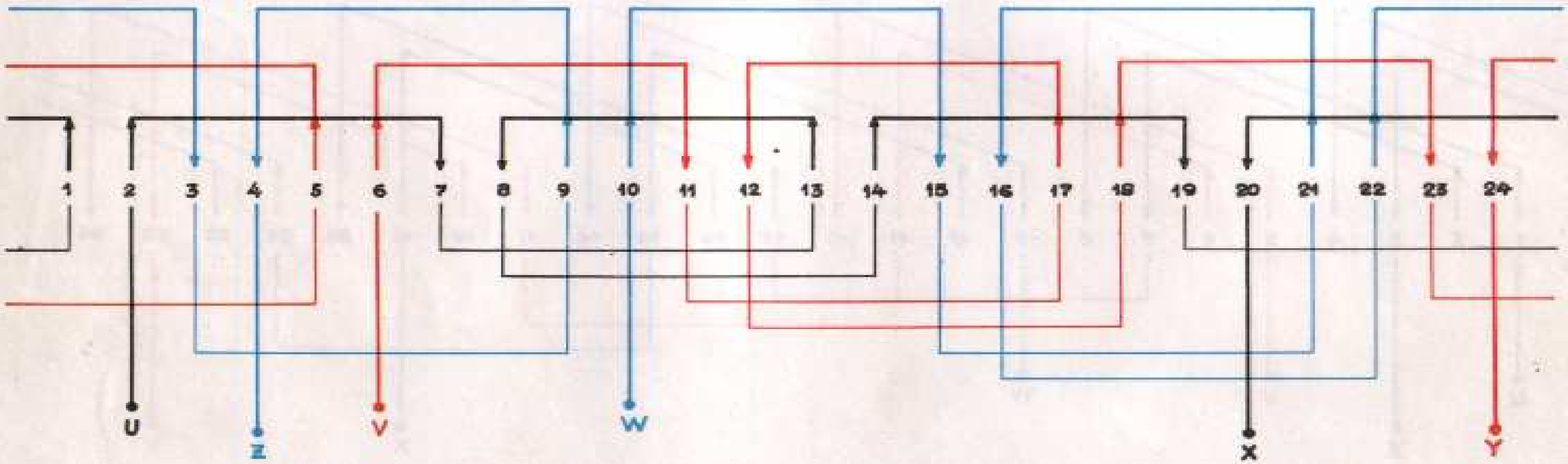
Por fase :

2 grupos de 2 bobinas . Paso : 1-6-8 (diam.)

Terminales : $U = 1$; $V = 5$; $W = 9$
$X = 19$; $Y = 23$; $Z = 3$

24 ranuras, 4 polos

4) A. a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos



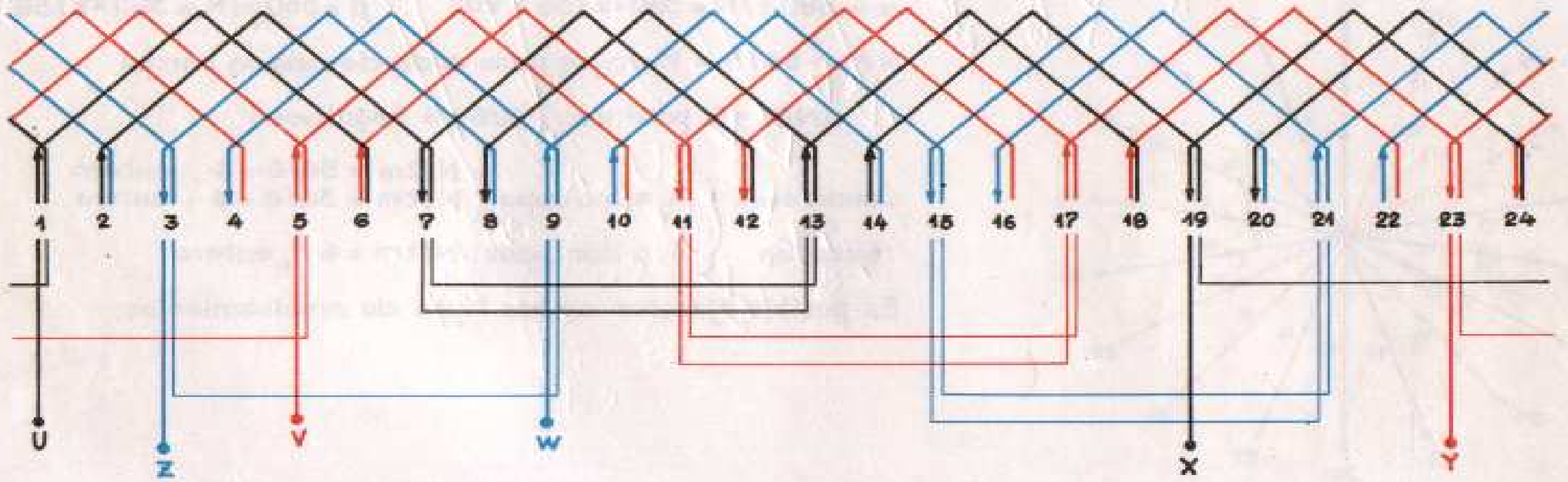
Por fase:

4 grupos de 1 bobina . Paso: 1-6

Terminales : $U = 2$; $V = 6$; $W = 10$
$X = 20$; $Y = 24$; $Z = 4$

24 ranuras , 4 polos

5) A. a dos capas, con paso acortado en una ranura

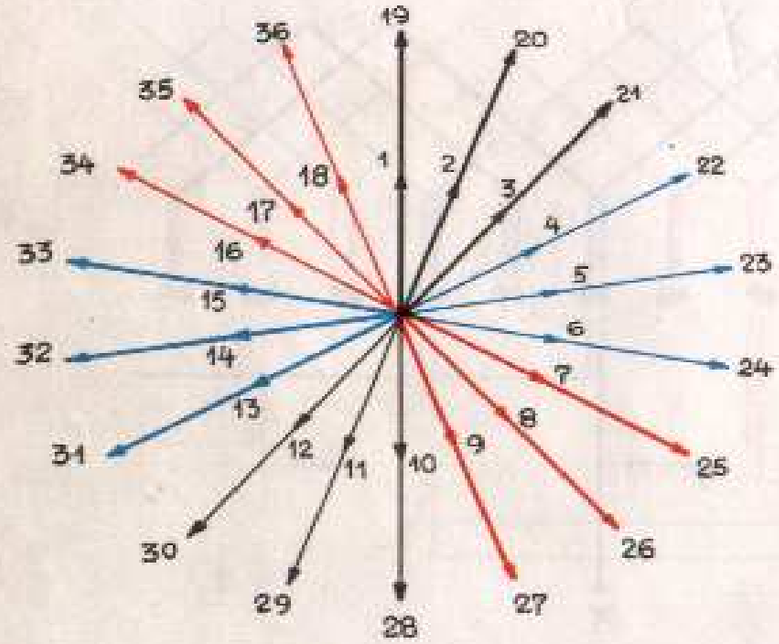


Por fase :

4 grupos de 2 bobinas . Paso : 1-6 (acort.)

Terminales : U = 1 ; V = 5 ; W = 9
X = 19 ; Y = 23 ; Z = 3

N = 36
P = 2



$q = N/2pm = 36/12 = 3$ A. entero

$t = 2$, $N/t = 36/2 = 18$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360 \times 2/36 = 20°$ $\beta = 360\,p/N = 360 \times 2/36 = 20°$

$N/3 = 36/3 = 12$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 6$ positivos , $N/6 = 6$ negativos)

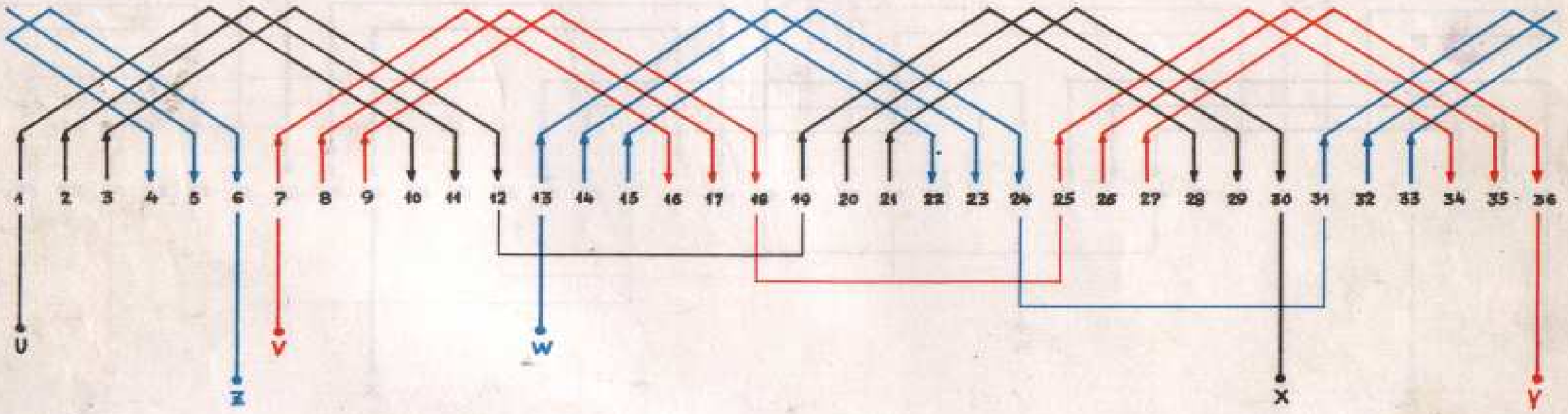
Condiciones de ejecución:
- A. a una capa: $N/2m = 36/6 = 6$, entero; $N/tm = 36/6 = 6$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 6$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

36 ranuras , 4 polos

1) A. a una capa , con bobinas de paso constante



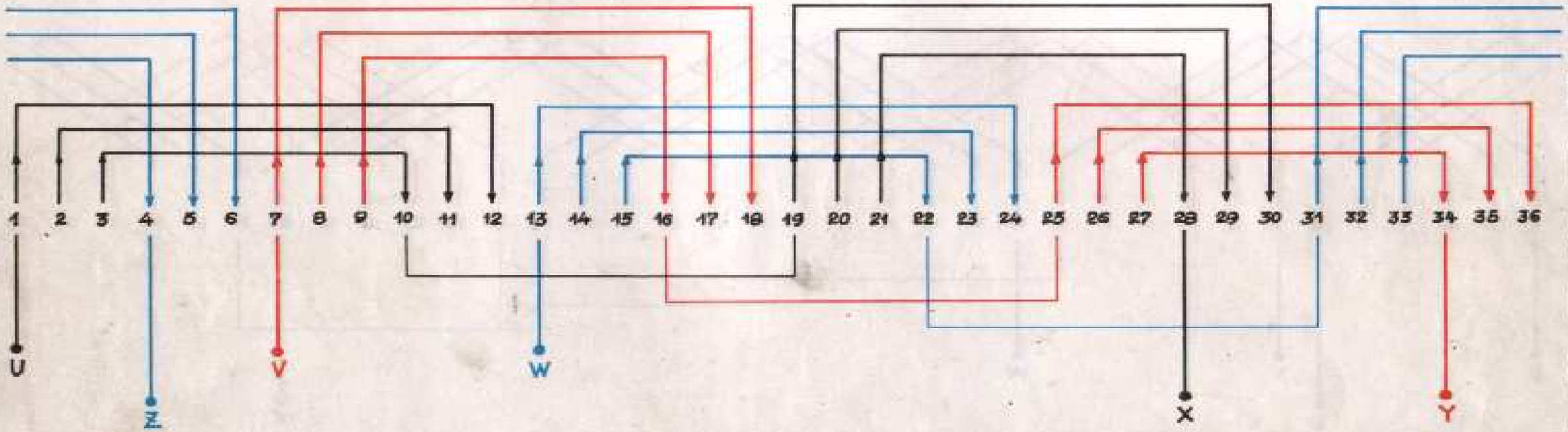
Por fase :

2 grupos de 3 bobinas . Paso : 1-10 (diam.)

Terminales : U = 1 ; V = 7 ; W = 13
X = 30 ; Y = 36 ; Z = 6

36 ranuras , 4 polos

2) A. a una capa , con bobinas de paso variable y cabezas en dos planos



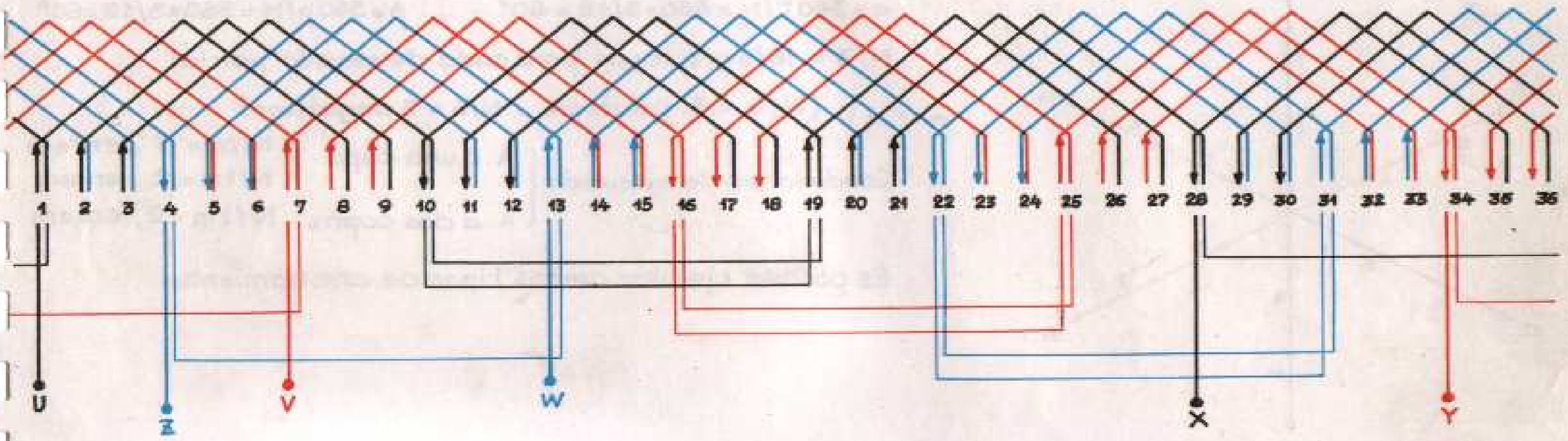
Por fase:

2 grupos de 3 bobinas . Paso : 1-8-10-12 (diam.)

Terminales : $U = 1$; $V = 7$; $W = 13$
$X = 28$; $Y = 34$; $Z = 4$

36 ranuras , 4 polos

3) A. a dos capas , con paso acortado en dos ranuras

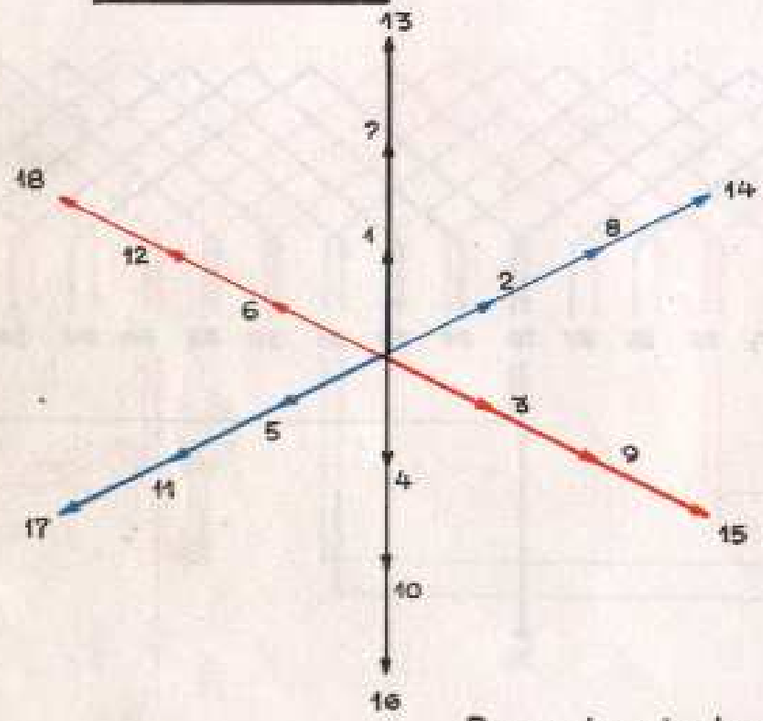


Por fase:

4 grupos de 3 bobinas. Paso: 1-8 (acort.)

Terminales: $U = 1$; $V = 7$; $W = 13$
$X = 28$; $Y = 34$; $Z = 4$

N = 18
p = 3



$q = N/2pm = 18/18 = 1$ A. entero

$t = 3$, $N/t = 18/3 = 6$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360t/N = 360 \times 3/18 = 60°$, $\beta = 360p/N = 360 \times 3/18 = 60°$

$N/3 = 18/3 = 6$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 3$ positivos, $N/6 = 3$ negativos)

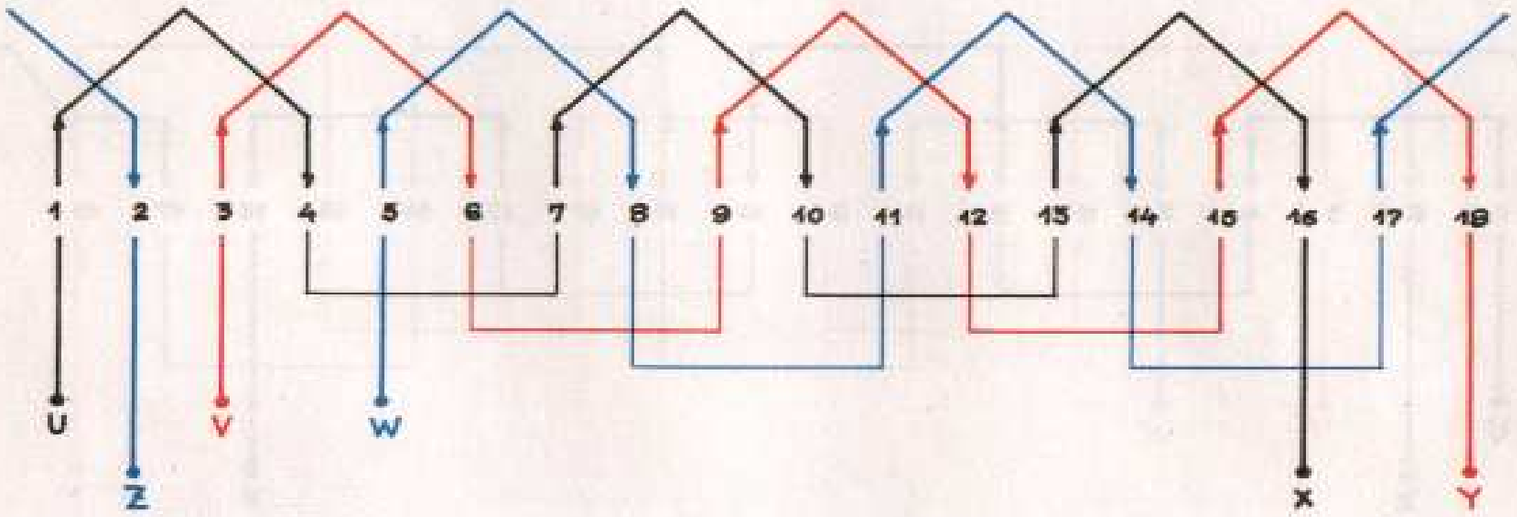
Condiciones de ejecución:
- A. a una capa: $N/2m = 3$, entero; $N/tm = 2$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 2$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

18 ranuras, 6 polos

1) A. a una capa, con bobinas de paso constante



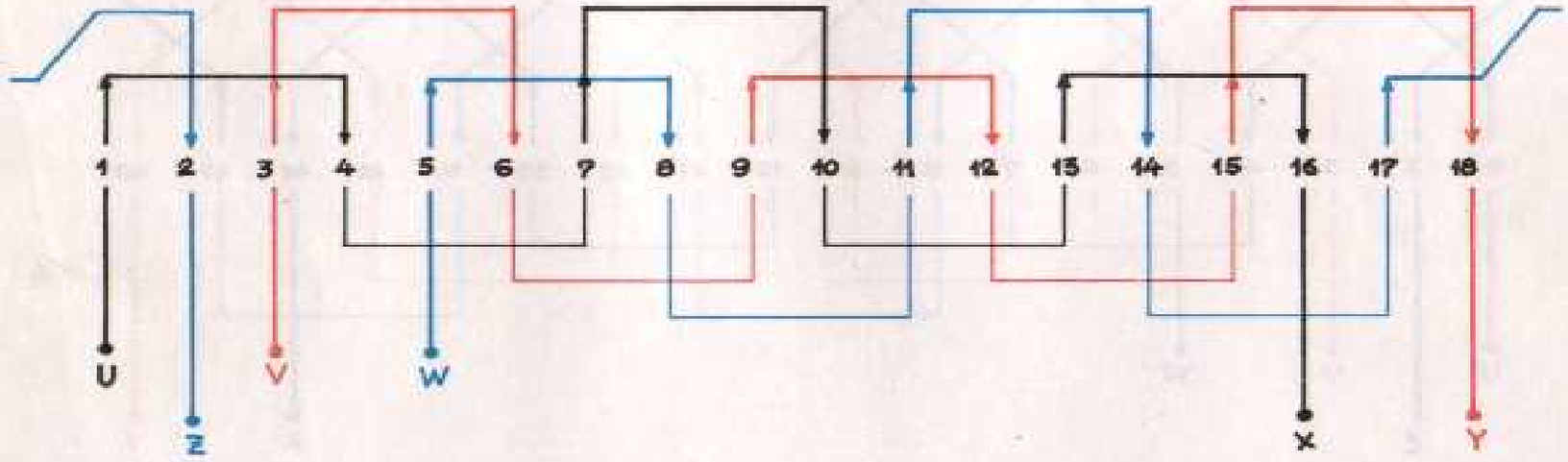
Por fase:

3 grupos de 1 bobina. Paso : 1-4 (diam.)

Terminales : $U = 1$; $V = 3$; $W = 5$
$X = 16$; $Y = 18$; $Z = 2$

18 ranuras , 6 polos

2) A. a una capa, con cabezas de bobina en dos planos



Por fase:

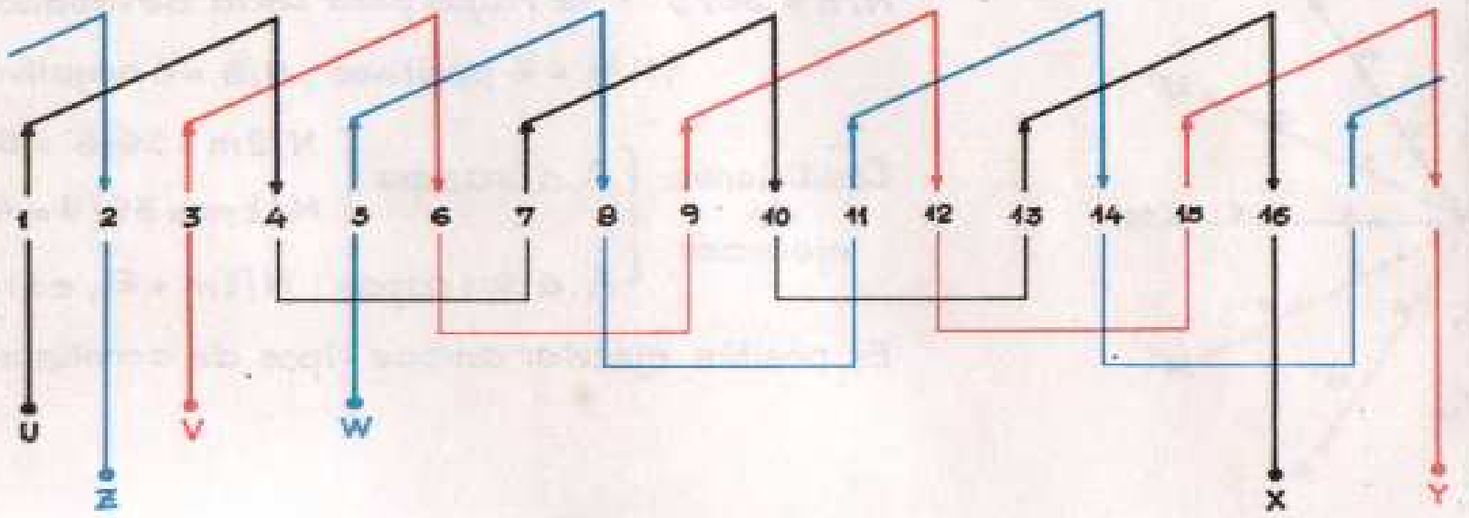
3 grupos de 1 bobina . Paso : 1-4 (diam.)

Terminales : U = 1 ; V = 3 ; W = 5
X = 16 ; Y = 18 ; Z = 2

"Siglo-Handbuch"

18 ranuras , 6 polos

3) A . a una capa, con cabezas de bobina de forma trapecial

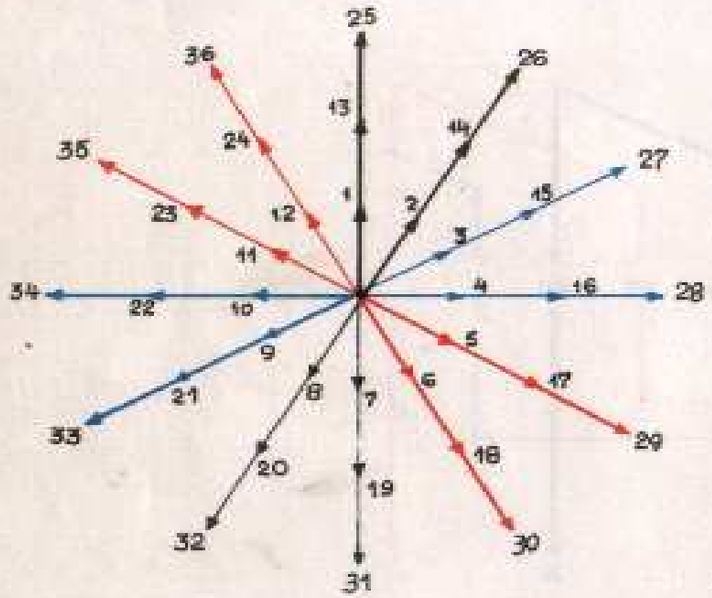


Por fase :

3 grupos de 1 bobina . Paso : 1-4 (diam.)

Terminales : $U = 1$; $V = 3$; $W = 5$
$X = 16$; $Y = 18$; $Z = 2$

N = 36
p = 3



$q = N/2pm = 36/18 = 2$ A. entero

$t = 3$, $N/t = 36/3 = 12$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360 \times 3/36 = 30°$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 3/36 = 30°$

$N/3 = 36/3 = 12$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 6$ positivos , $N/6 = 6$ negativos)

Condiciones de ejecución:

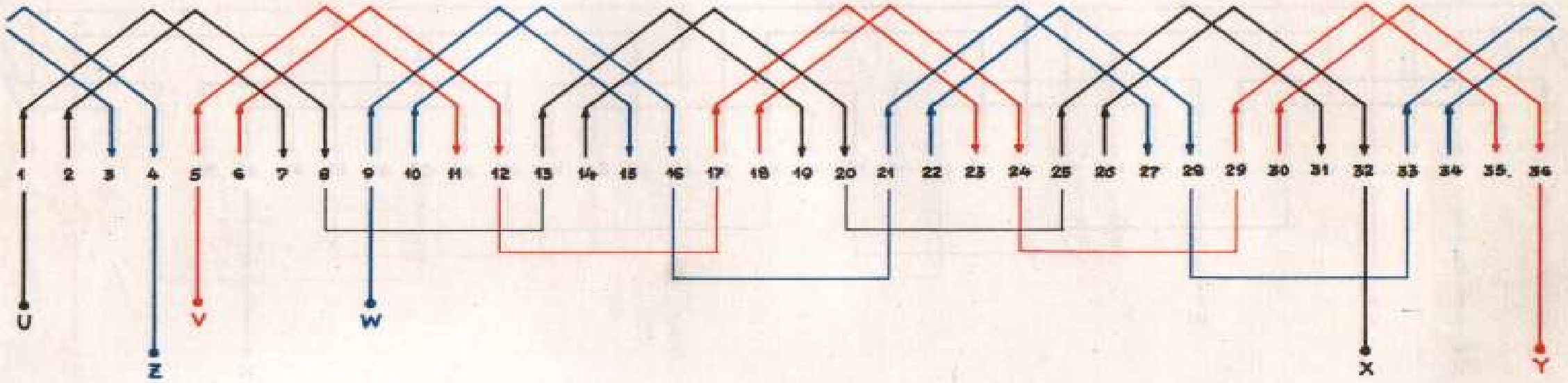
- A. a una capa:
  - $N/2m = 36/6 = 6$, entero
  - $N/tm = 36/9 = 4$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 6$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

36 ranuras , 6 polos

1) A. a una capa, con bobinas de paso constante



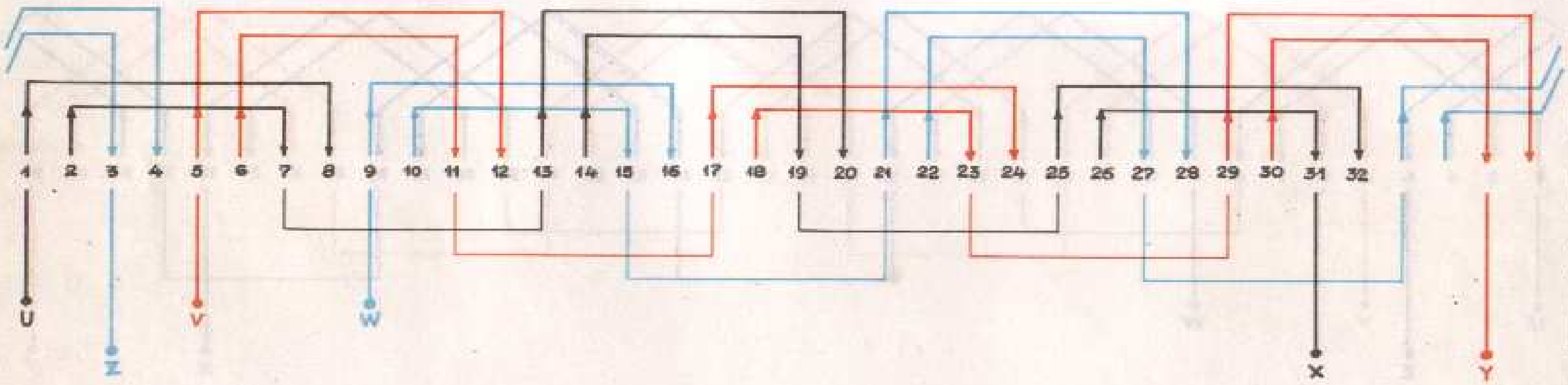
Por fase :

3 grupos de 2 bobinas. Paso: 1-7 (diam.)

Terminales: $U = 1$; $V = 5$; $W = 9$
$X = 32$; $Y = 36$; $Z = 4$

36 ranuras , 6 polos

2) A. a una capa, con bobinas de paso variable y cabezas en dos planos



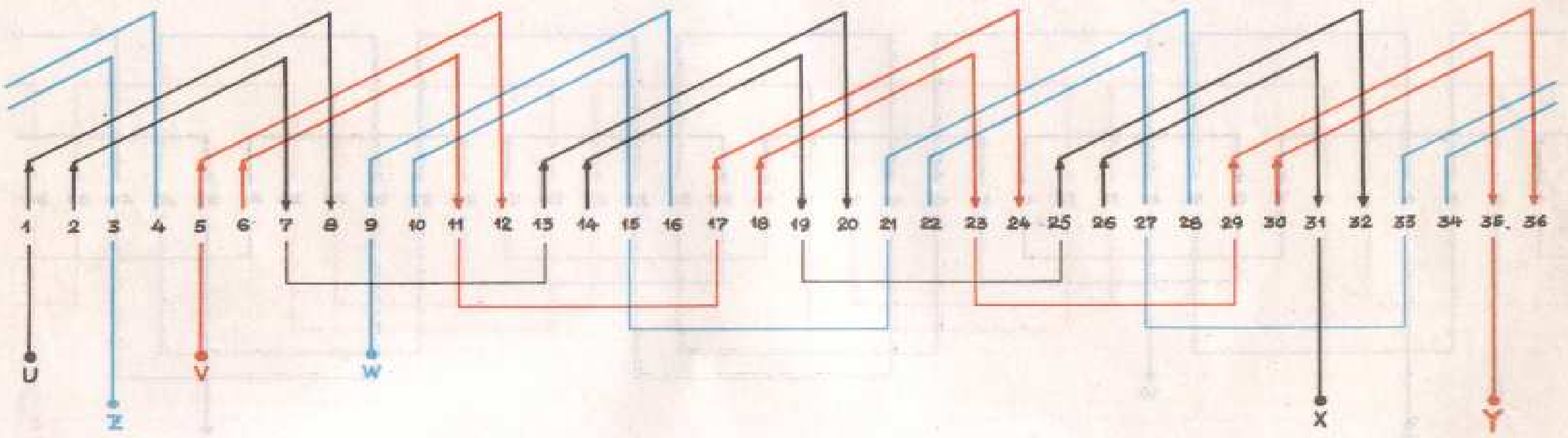
Por fase:

3 grupos de 2 bobinas. Paso: 1-6-8 (diam.)

Terminales: $U = 1$; $V = 5$; $W = 9$
$X = 31$; $Y = 35$; $Z = 3$

36 ranuras, 6 polos

3) A. a una capa, con bobinas de paso variable y forma trapecial



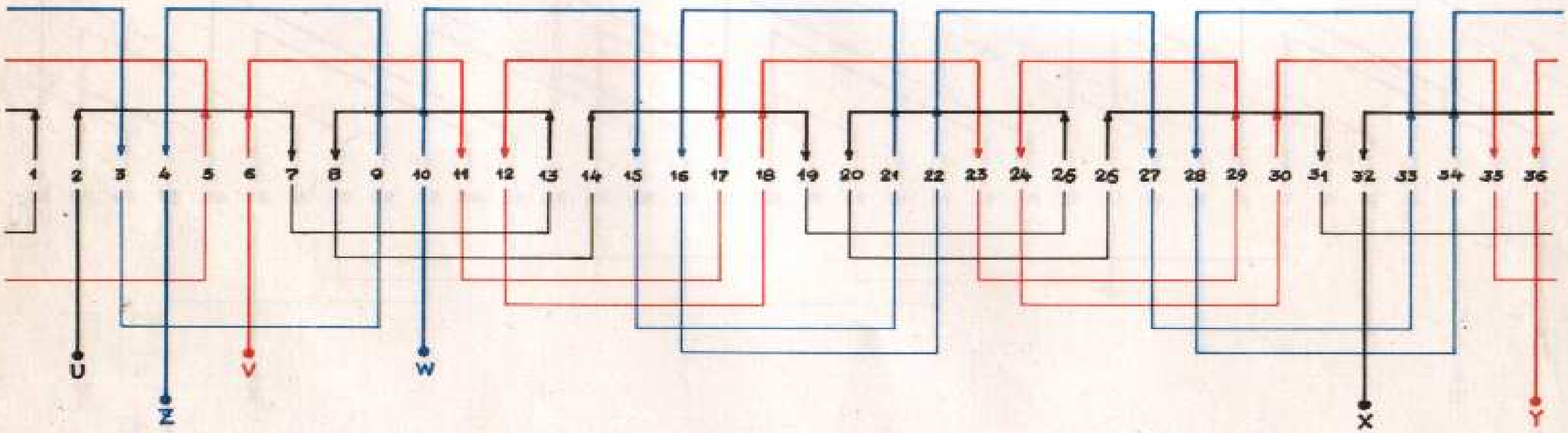
Por fase:

3 grupos de 2 bobinas. Paso: 1-6-8 (diam.)

Terminales: $U = 1$; $V = 5$; $W = 9$
$X = 31$; $Y = 35$; $Z = 3$

36 ranuras, 6 polos

4) A. a una capa, con cabezas de bobina en tres planos



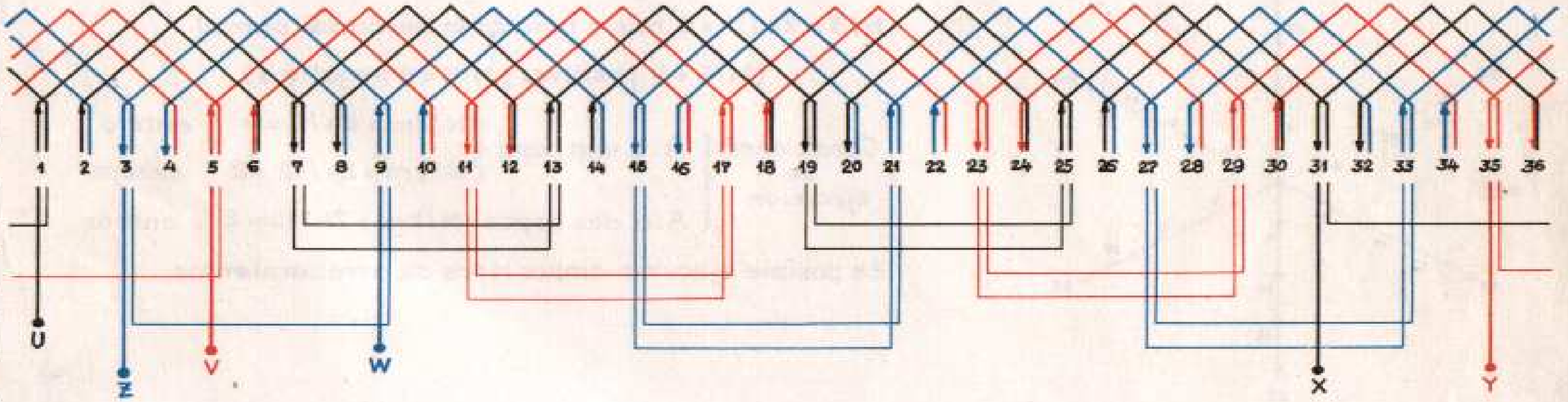
Por fase:

6 grupos de una bobina. Paso: 1-6

Terminales: U = 2 ; V = 6 ; W = 10
X = 32 ; Y = 36 ; Z = 4

36 ranuras, 6 polos

5) A. a dos capas, con paso acortado en una ranura

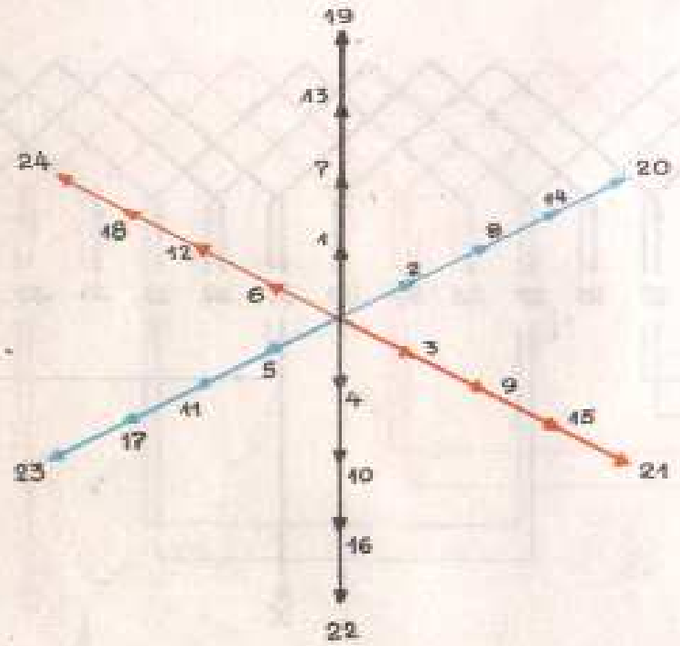


Por fase:

6 grupos de 2 bobinas. Paso: 1-6 (diam.)

Terminales: U = 1 ; V = 5 ; W = 9
X = 31 ; Y = 35 ; Z = 3

N = 24
P = 4



$q = N/2pm = 24/24 = 1$ A. entero

$t = 4$, $N/t = 24/4 = 6$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360 \times 4/24 = 60°$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 4/24 = 60°$

$N/3 = 24/3 = 8$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 4$ positivos , $N/6 = 4$ negativos)

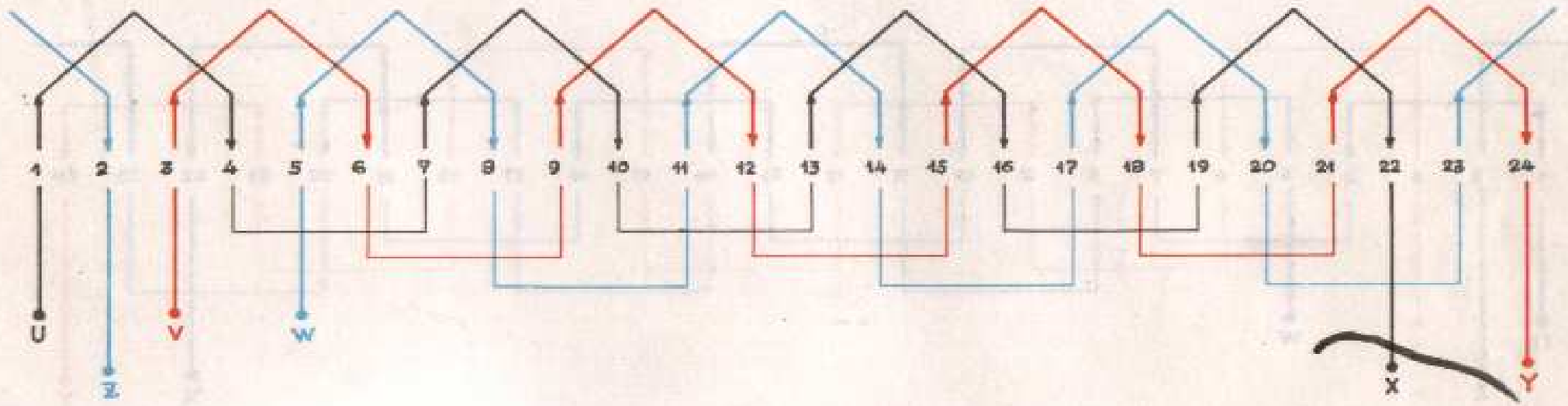
Condiciones de ejecución:
- A. a una capa:
  - $N/2m = 24/6 = 4$, entero
  - $N/tm = 24/12 = 2$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 24/12 = 2$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

24 ranuras , 8 polos

1) A. a una capa, con bobinas de paso constante



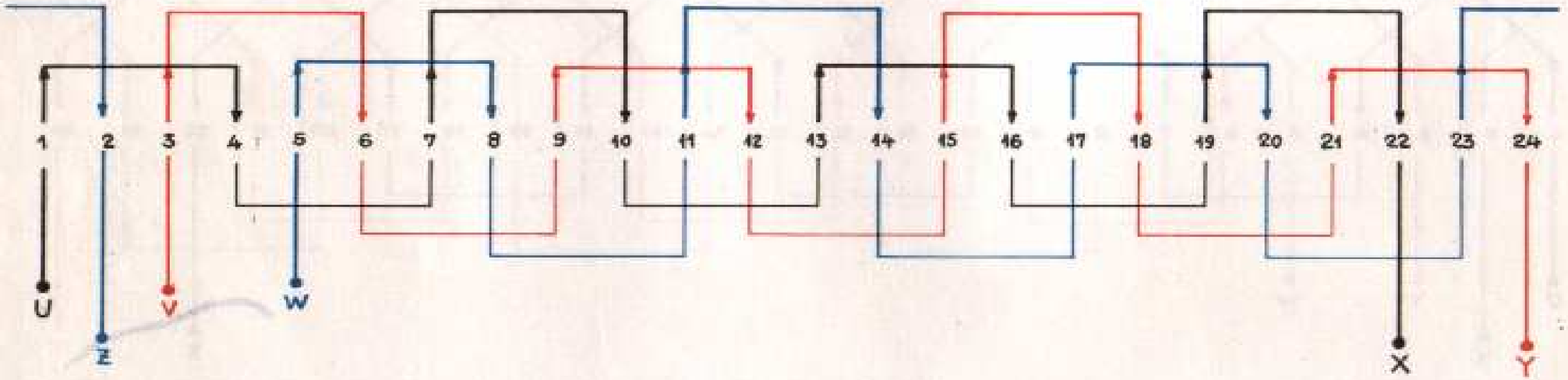
Por fase:

4 grupos de 1 bobina. Paso: 1-4 (diam.)

Terminales: U = 1 ; V = 3 ; W = 5
X = 22 ; Y = 24 ; Z = 2

24 ranuras, 8 polos

2) A. a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos



Por fase:

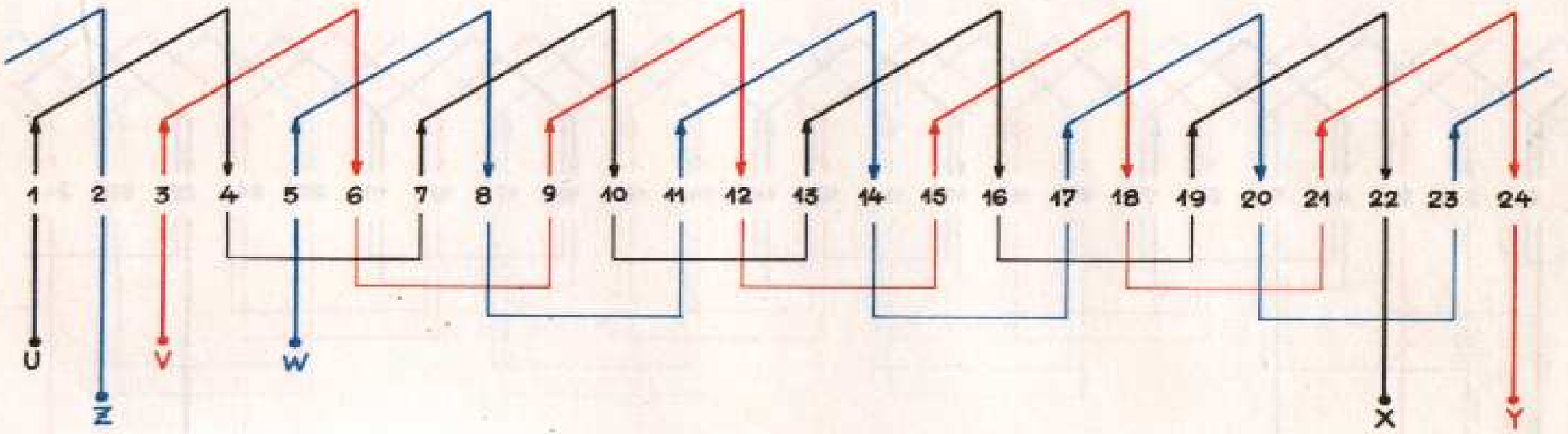
4 grupos de 1 bobina. Paso: 1:4 (diam.)

Terminales: U = 1 ; V = 3 ; W = 5
X = 22 ; Y = 24 ; Z = 2

Sofin-Handdruck

24 ranuras, 8 polos

3) A. a una capa, con cabezas de bobina de forma trapecial



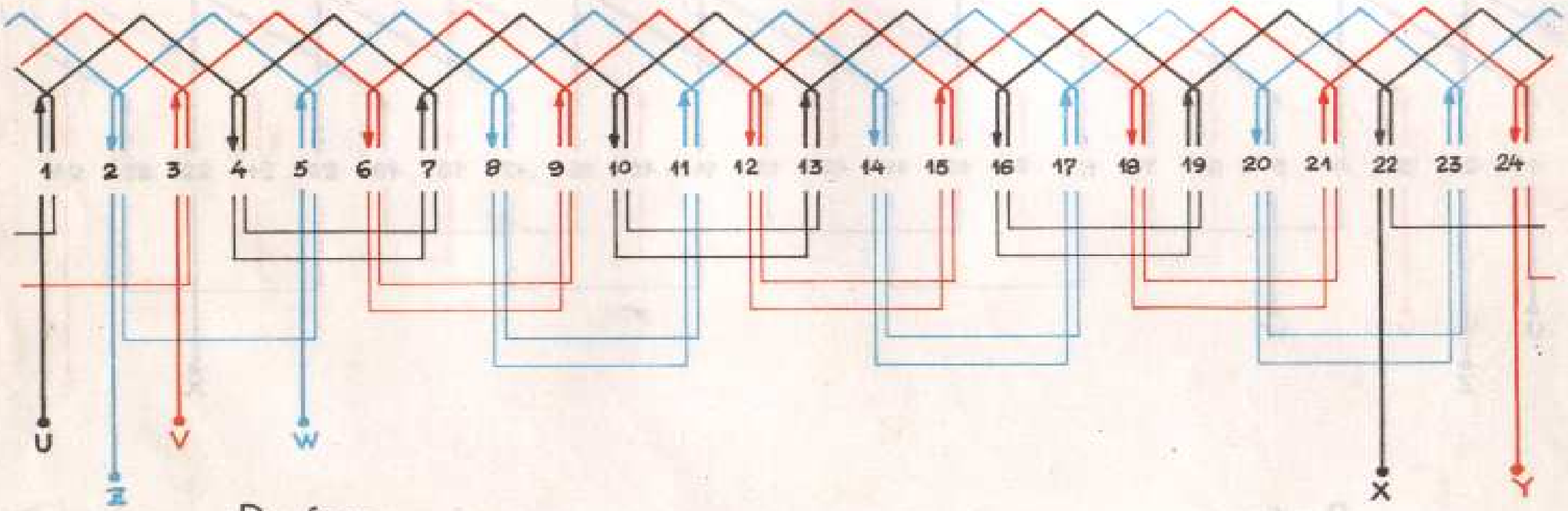
Por fase :

4 grupos de 1 bobina. Paso : 1-4 (diam.)

Terminales: $U=1$; $V=3$; $W=5$
$X=22$; $Y=24$; $Z=2$

24 ranuras, 8 polos

4) A. a dos capas, con paso diametral



Por fase:

8 grupos de 1 bobina. Paso: 1-4 (diam.)

Terminales: $U = 1$; $V = 3$; $W = 5$
$X = 22$; $Y = 24$; $Z = 2$

II. ARROLLAMIENTOS FRACCIONARIOS

Arrollamientos fraccionarios son aquellos en los que el número de ranuras por polo y fase ($q = N/2pm$) es un número no entero.

Los esquemas que se presentan a continuación incluyen numerosos arrollamientos posibles para máquinas trifásicas con ranuras desde $N = 12$ hasta $N = 39$, y con un número total de polos desde $2p = 2$ hasta $2p = 8$. Delante de cada conjunto de planes de arrollamientos posibles para unos determinados valores de N, $2p$ y m, se ha dibujado la correspondiente estrella de ranuras, con la distribución de rayos, lo que proporciona la situación exacta de los lados de bobinas de cada fase, y el sentido de la corriente en dichos lados.

Asimismo se ha analizado, de acuerdo con lo expuesto en el capítulo X, la posibilidad de ejecución de arrollamientos a una y a dos capas.

Los arrollamientos fraccionarios ya no se pueden dibujar fácilmente sin seguir un método sistemático, por lo que queda bien patente, en ellos las ventajas de la aplicación del método de la estrella de ranuras. Solamente en aquellos arrollamientos fraccionarios en los cuales q consta de una fracción mitad (o sea, con $q = 1{,}5;\ 2{,}5;\ 3{,}5$, etc.) se puede dar una regla fácil, análoga a la seguida para los arrollamientos enteros, para situar los lados de bobinas en sus correspondientes ranuras:

— Primero se disponen $q + 0{,}5$ lados de bobinas de la fase A (corriente hacia arriba).

— A continuación, $q - 0{,}5$ lados de bobinas de la fase C (corriente hacia abajo).

— Seguidamente, $q + 0{,}5$ lados de bobinas de la fase B (corriente hacia arriba).

— Después, $q - 0{,}5$ lados de bobinas de la fase A (corriente hacia abajo), y así sucesivamente, repitiéndose lo expuesto hasta completar todas las ranuras de la máquina.

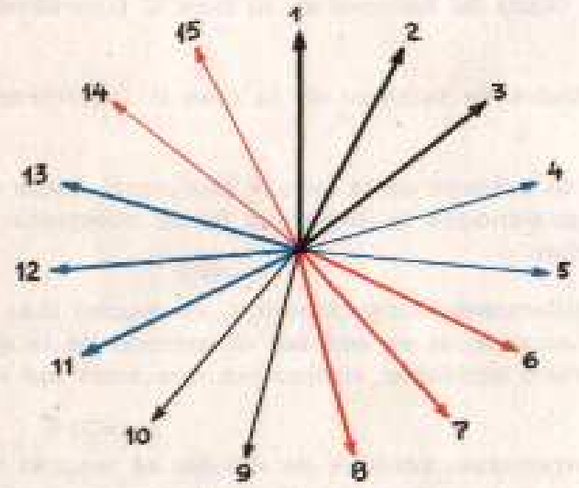
En los demás casos de arrollamientos fraccionarios, es mucho más cómodo, y menos probable equivocarse, si se emplea el método de la estrella de ranuras, el cual es siempre aplicable, cualquiera que sean los valores de N, p y m.

En algunos de los casos expuestos, además de dibujar el reparto normal de rayos de la estrella de ranuras, se han distribuido los rayos de acuerdo con lo expresado en el capítulo XI. Dicha distribución permite efectuar conexiones en paralelo.

Todas las conexiones de los arrollamientos expuestos se han verificado en serie, incluso las de aquellos casos en que se ha variado la distribución de rayos de la estrella. Si se desean ejecutar conexiones en paralelo, se pueden consultar las tablas y esquemas que se exponen a partir de la página 208. Sobre la posibilidad eléctrica de realización de conexiones en paralelo, hay que atender cuidadosamente a lo expresado en el capítulo XI.

En cuanto a las cabezas de bobinas y al paso del devanado, véanse las orientaciones dadas al tratar los esquemas de arrollamientos enteros (página 87).

N = 15
P = 1



$q = N/2pm = 15/6 = 2,5$ A. fraccionario

$t = 1$, $N/t = 15/1 = 15$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360t/N = 360/15 = 24°$, $\beta = 360p/N = 360/15 = 24°$

$N/3 = 15/3 = 5$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 + 0,5 = 3$ positivos , $N/6 - 0,5 = 2$ negativos)

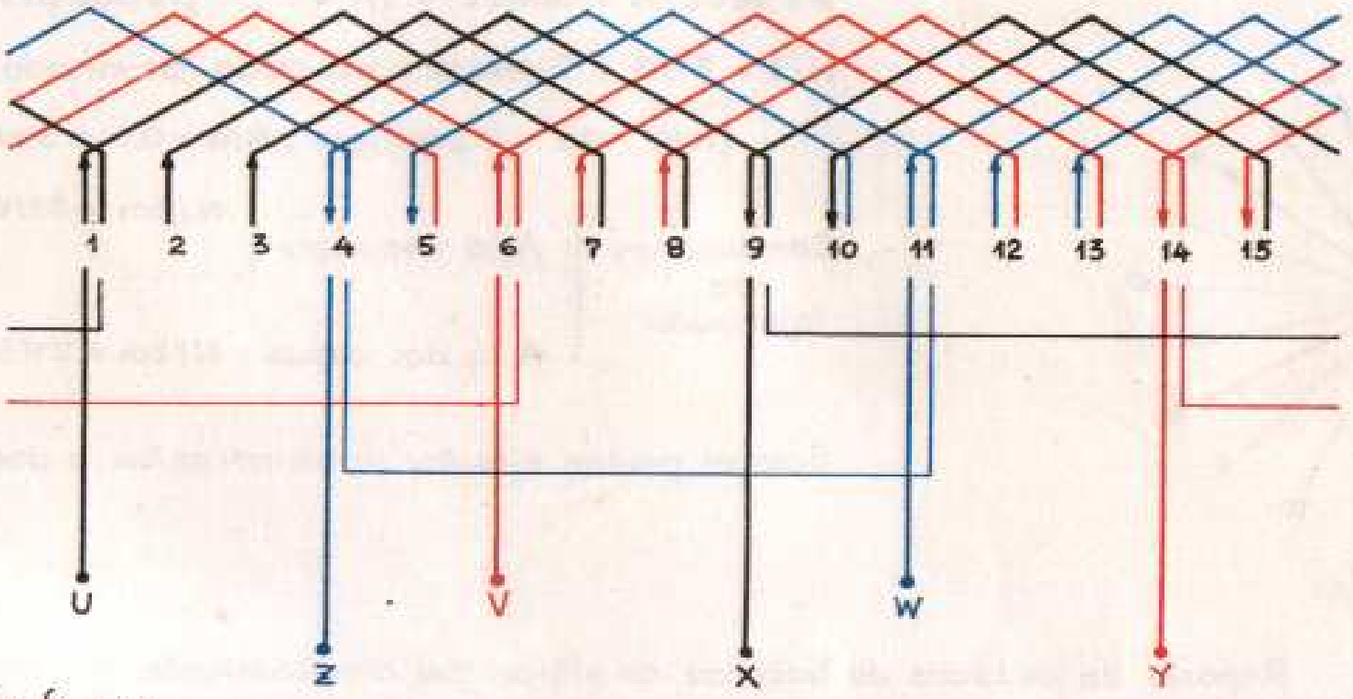
Condiciones de ejecución:
- A. a una capa: $N/2m = 15/6 = 2,5$, no entero
  - .....
- A. a dos capas: $N/tm = 15/3 = 5$, entero

Sólo es posible ejecutar arrollamientos a dos capas

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

15 ranuras, 2 polos

A. a dos capas, con paso acortado y = 1:7

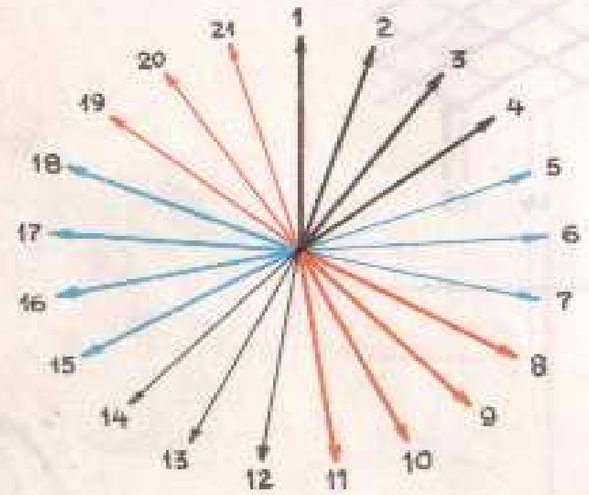


Por fase :

1 grupo de 3 bobinas y 1 grupo de 2 bobinas

Terminales : U = 1 ; V = 6 ; W = 11
X = 9 ; Y = 14 ; Z = 4

N = 21
p = 1



$q = N/2pm = 21/6 = 3,5$ A. fraccionario

$t = 1$, $N/t = 21/1 = 21$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360/21 \cong 17° 8'$, $\beta = 360\,p/N = \alpha$

$N/3 = 21/3 = 7$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 + 0,5 = 4$ positivos , $N/6 - 0,5 = 3$ negativos)

Condiciones de ejecución:

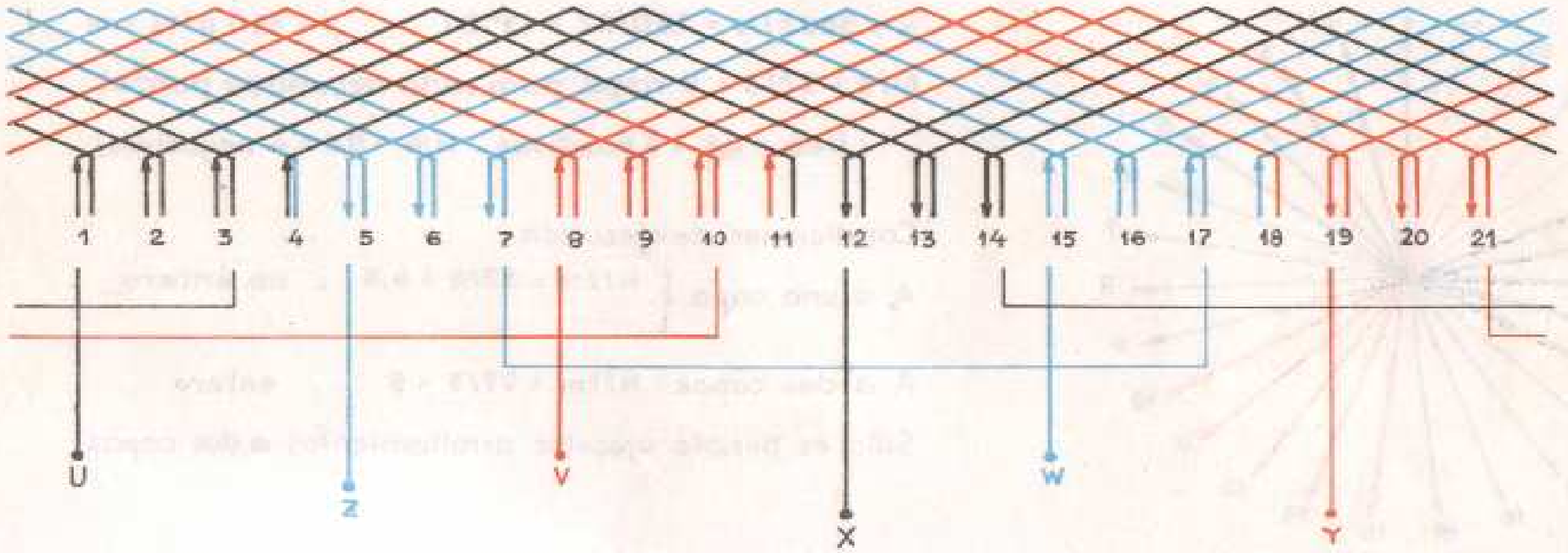
- A. a una capa: $N/2m = 21/6 = 3,5$, no entero
  - .....
- A. a dos capas: $N/tm = 21/3 = 7$, entero

Sólo es posible ejecutar arrollamientos a dos capas

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

21 ranuras , 2 polos

A. a dos capas , con paso acortado y = 1:11

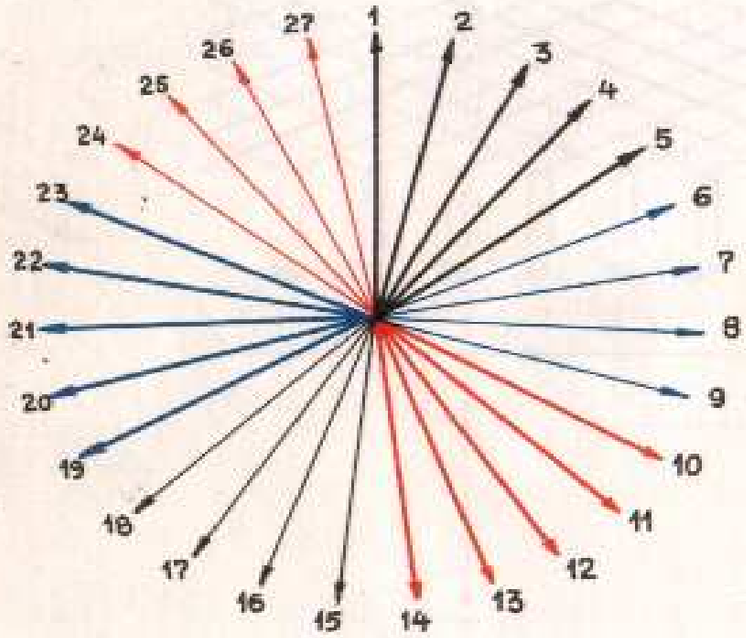


Por fase:

1 grupo de 4 bobinas y 1 grupo de tres bobinas . Se podría tomar el paso y = 1 : 10

Terminales: U = 1 ; V = 8 ; W = 15
X = 12 ; Y = 19 ; Z = 5

N = 27
P = 1



$q = N/2pm = 27/6 = 4,5$ A. fraccionario

$t = 1$, $N/t = 27/1 = 27$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360/27 = 13° 20'$, $\beta = 360\,p/N = \alpha$

$N/3 = 27/3 = 9$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 + 0,5 = 5$ positivos , $N/6 - 0,5 = 4$ negativos)

Condiciones de ejecución :

A. a una capa { $N/2m = 27/6 = 4,5$, no entero
.....

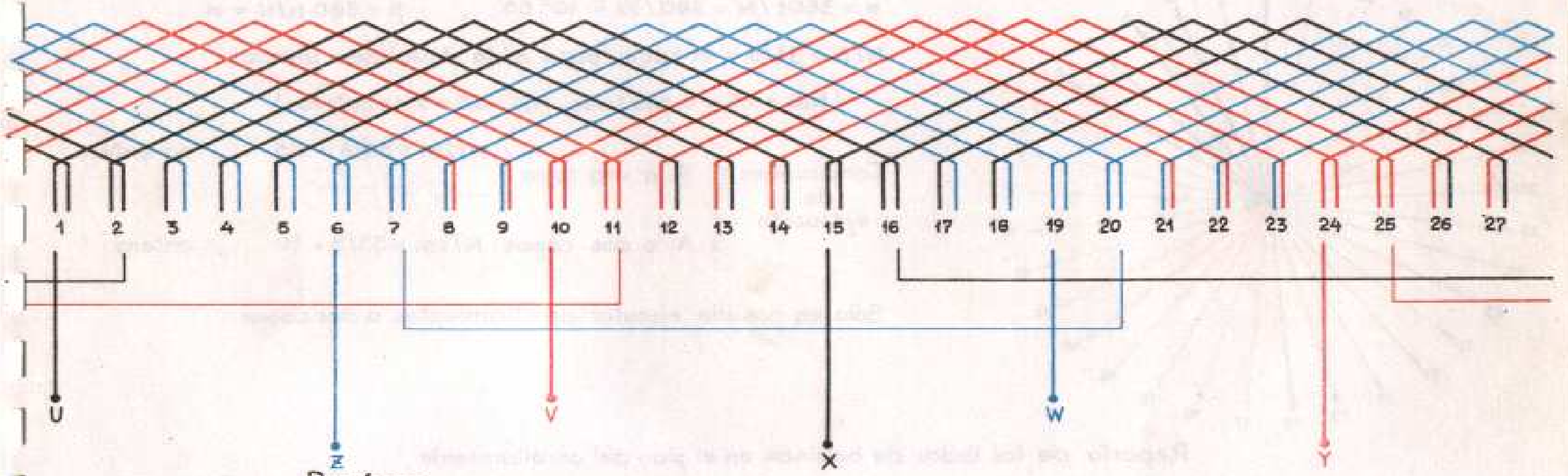
A. a dos capas : $N/tm = 27/3 = 9$, entero

Sólo es posible ejecutar arrollamientos a dos capas

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

27 ranuras , 2 polos

A. a dos capas, con paso acortado y = 1 : 12

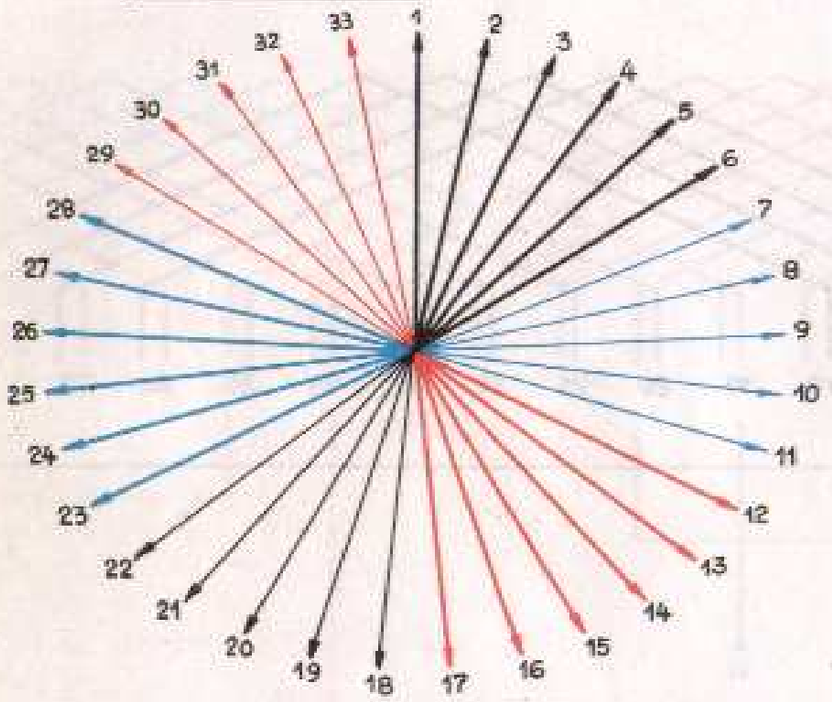


Por fase :

1 grupo de 5 bobinas y 1 grupo de 4 bobinas. No conviene acortar más el paso

Terminales : U = 1 ; V = 10 ; W = 19
X = 15 ; Y = 24 ; Z = 6

N = 33
p = 1



$q = N/2pm = 33/6 = 5{,}5$ A. fraccionario

$t = 1$, $N/t = 33/1 = 33$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360/33 \cong 10° 55'$, $\beta = 360\,p/N = \alpha$

$N/3 = 33/3 = 11$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 + 0{,}5 = 6$ positivos, $N/6 - 0{,}5 = 5$ negativos)

Condiciones de ejecución:

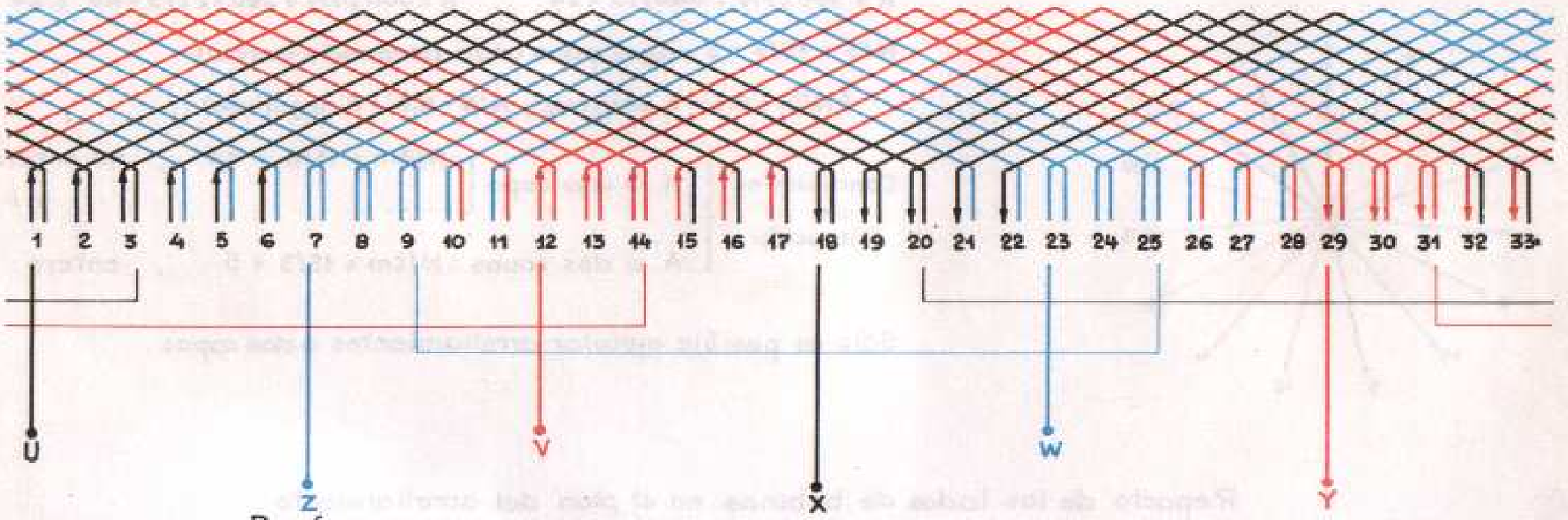
- A. a una capa: $N/2m = 33/6 = 5{,}5$, no entero
- A. a dos capas: $N/tm = 33/3 = 11$, entero

Sólo es posible ejecutar arrollamientos a dos capas

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

33 ranuras , 2 polos

A. a dos capas, con paso acortado y = 1:15

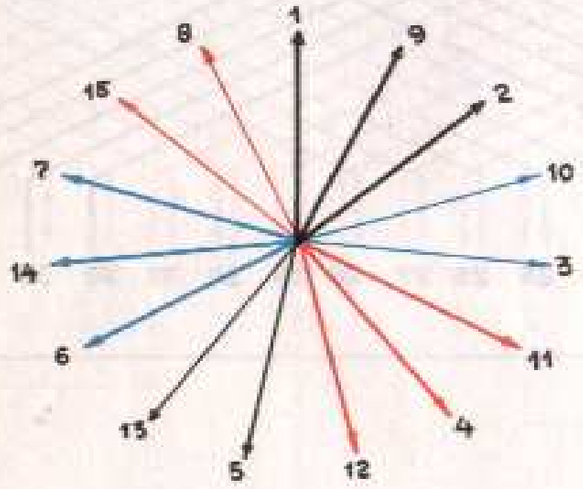


Por fase :

1 grupo de 6 bobinas y 1 grupo de 5 bobinas. No conviene acortar más el paso

Terminales : U = 1 ; V = 12 ; W = 23
X = 18 ; Y = 29 ; Z = ?

N = 15
p = 2



$q = N/2pm = 15/12 = 1{,}25$ A. fraccionario

$t = 1$, $N/t = 15/1 = 15$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360/15 = 24°$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 2/15 = 48° = 2\alpha$

$N/3 = 15/3 = 5$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 + 0{,}5 = 3$ positivos , $N/6 - 0{,}5 = 2$ negativos)

Condiciones de ejecución:

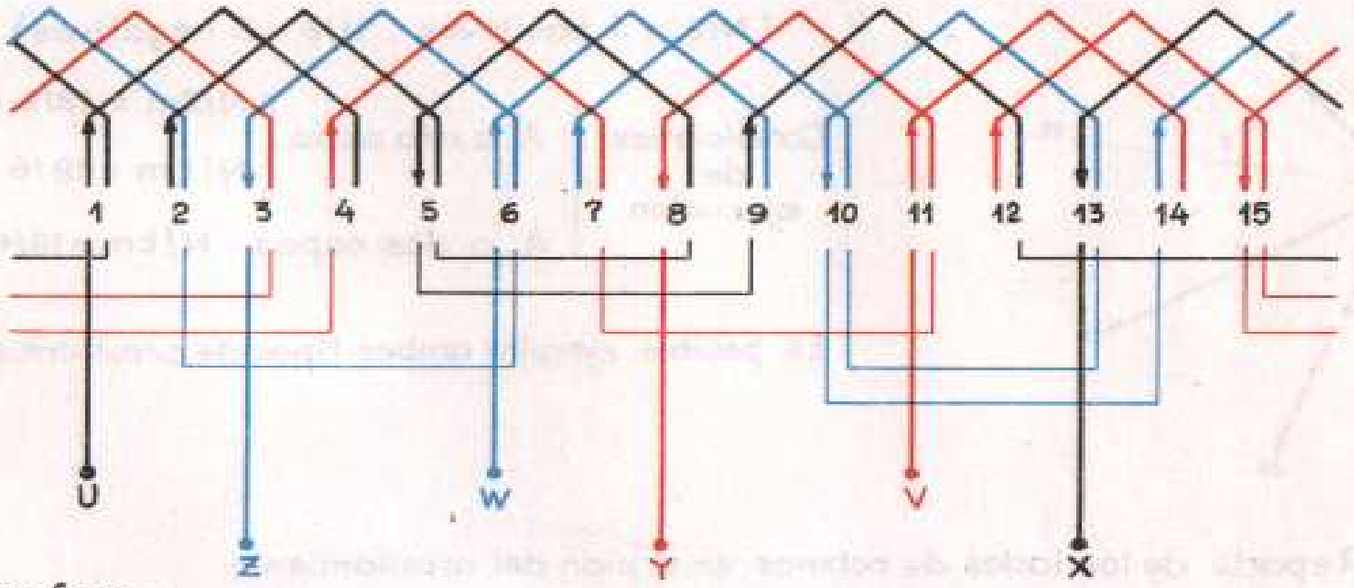
- A. a una capa: $N/2m = 15/6 = 2{,}5$, no entero
  - .....
- A. a dos capas: $N/tm = 15/3 = 5$, entero

Sólo es posible ejecutar arrollamientos a dos capas

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

15 ranuras , 4 polos

A. a dos capas, con paso acortado y = 1:4

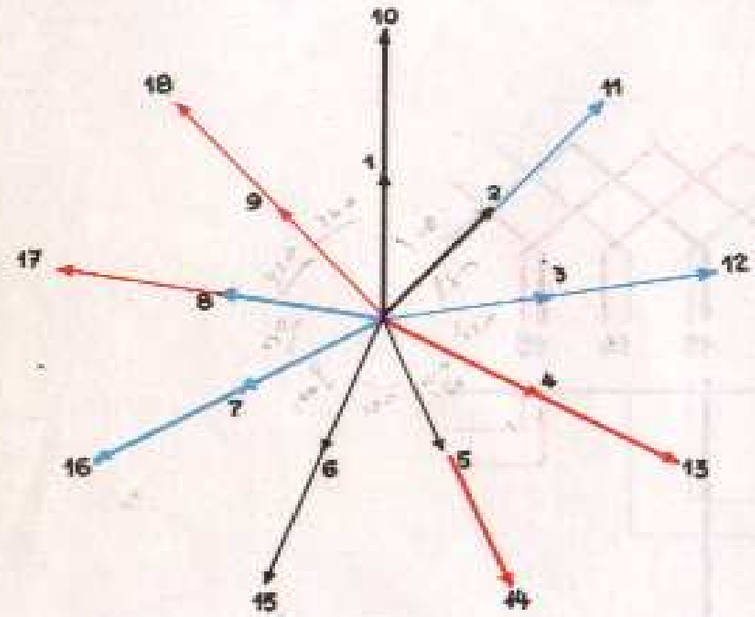


Por fase:

1 grupo de 2 bobinas y 3 grupos de 1 bobina. No conviene acortar más el paso

Terminales: U = 1 ; V = 11 ; W = 6
X = 13 ; Y = 8 ; Z = 3

N = 18
P = 2



$q = N/2pm = 18/12 = 1,5$ A. fraccionario

$t = 2$, $N/t = 18/2 = 9$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360t/N = 360 \times 2/18 = 40°$, $\beta = 360p/N = 360 \times 2/18 = 40° = \alpha$

$N/3 = 18/3 = 6$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 3$ positivos , $N/6 = 3$ negativos)

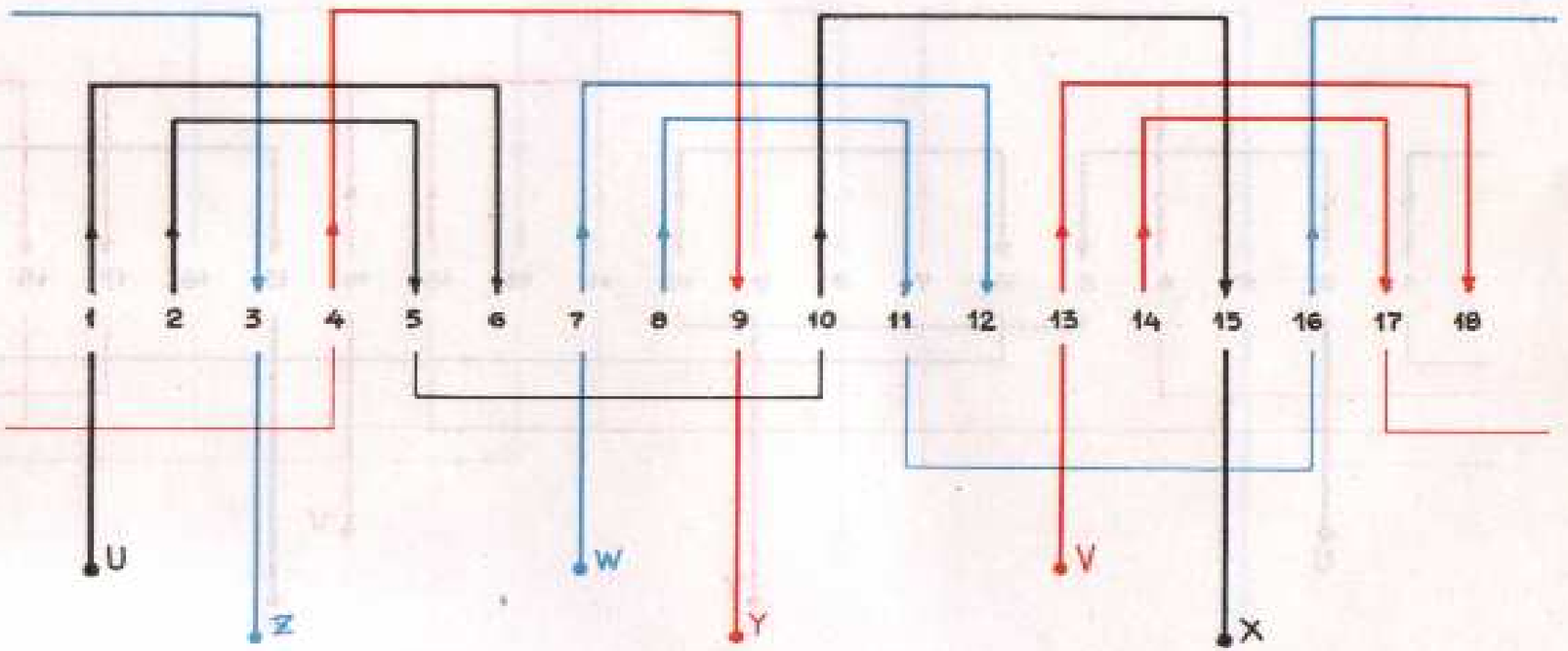
Condiciones de ejecución:
- A. a una capa:
  - $N/2m = 18/6 = 3$, entero
  - $N/tm = 18/6 = 3$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 18/6 = 3$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

18 ranuras, 4 polos

1) A. a una capa, con bobinas de paso variable (2 planos)



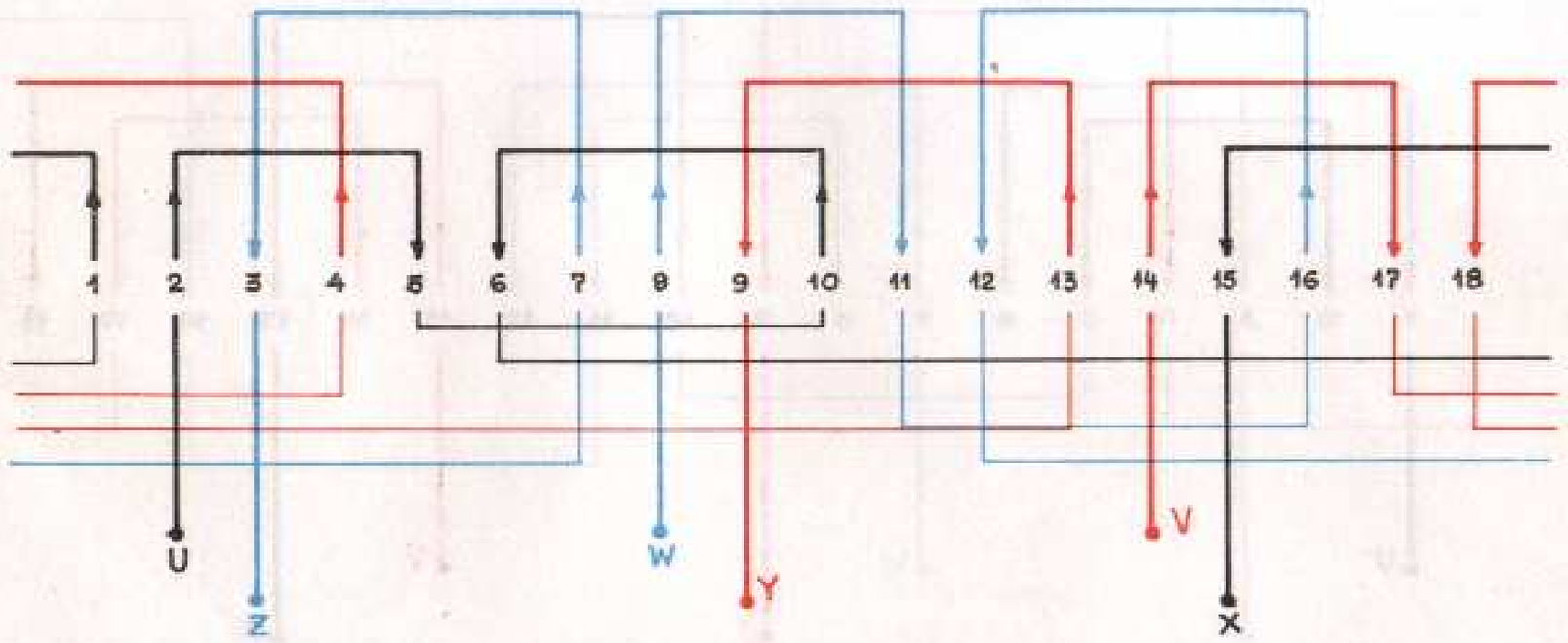
Por fase:

1 grupo de 2 bobinas (paso y = 1:4:6) y 1 grupo de 1 bobina (paso y = 1:6)

Terminales: U = 1 ; V = 13 ; W = 7
X = 15 ; Y = 9 ; Z = 3

18 ranuras , 4 polos

2) A. a una capa, con bobinas de paso variable (3 planos)



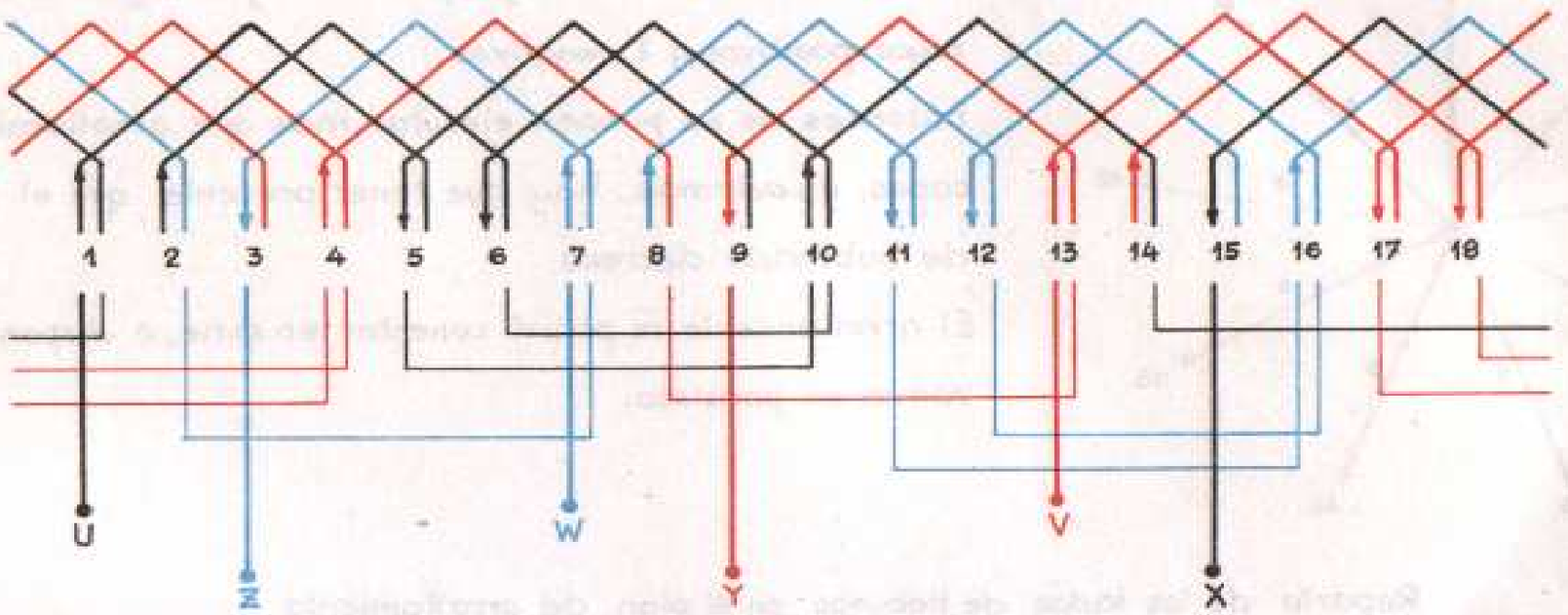
Por fase:

1 grupo de 1 bobina (paso 1:4) y 2 grupos de bobinas (paso 1:5)

Terminales : U = 2 ; V = 14 ; W = 8
X = 15 ; Y = 9 ; Z = 3

18 ranuras , 4 polos

3) A. a dos capas, con paso acortado y = 1:5

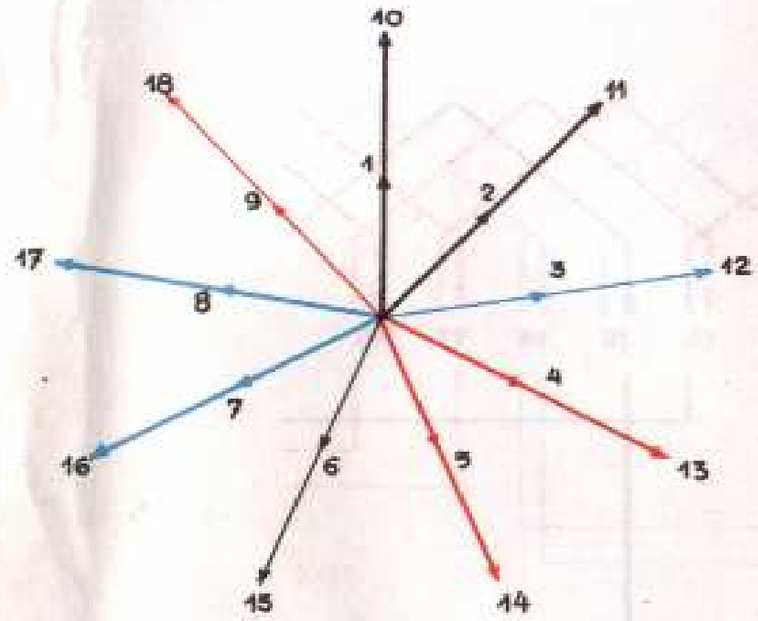


Por fase:

2 grupos de 2 bobinas y 2 grupos de 1 bobina. No conviene acortar más el paso

Terminales: $U = 1$; $V = 13$; $W = 7$
$X = 15$; $Y = 9$; $Z = 3$

N = 18
P = 2



Modificación del reparto de rayos de la estrella

Para poder verificar conexiones en paralelo, en vez de tomar en la estrella de ranuras 3 rayos positivos y 3 negativos, tomamos 4 rayos positivos y 2 negativos.

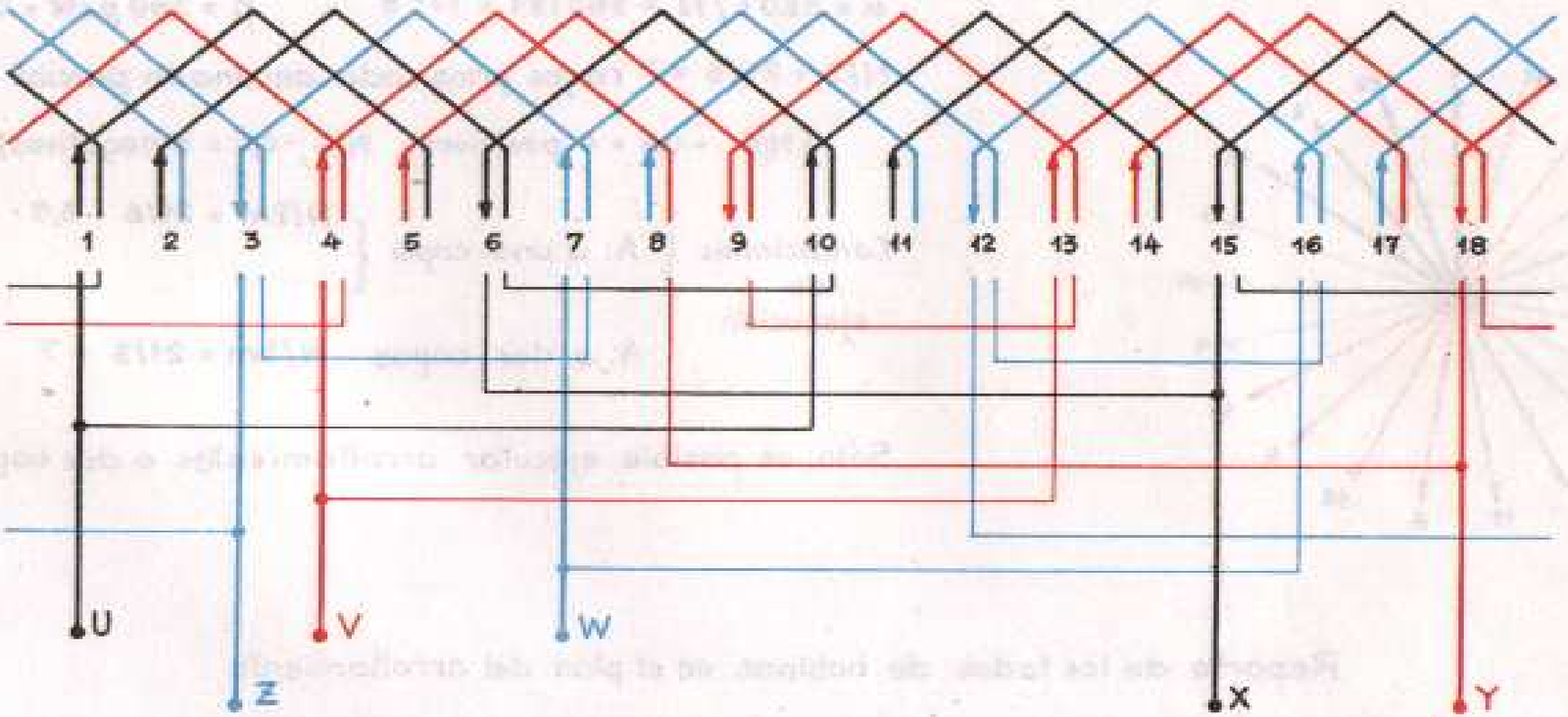
Entonces no se pueden ejecutar mas que arrollamientos a dos capas, y, además, hay que tener presente que el factor total de bobinado decrece.

El arrollamiento se podrá conectar en serie, o disponiendo 2 ramas en paralelo.

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

18 ranuras, 4 polos

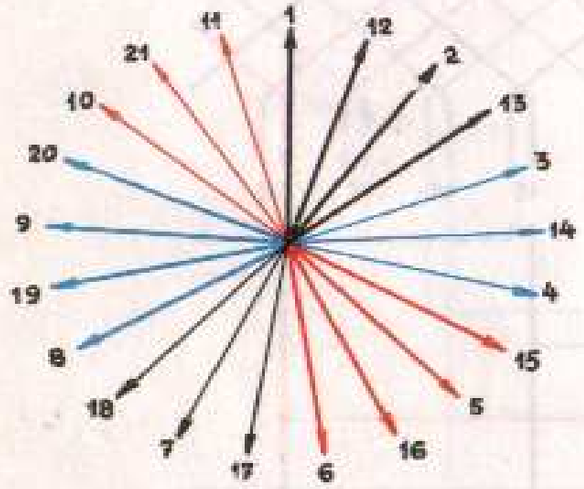
A. a dos capas, con paso acortado y = 1:5. Conexión en paralelo



Por fase: 2 grupos de 2 bobinas y 2 grupos de 1 bobina. No conviene acortar más el paso

Terminales: U = 1 ; V = 4 ; W = 7
X = 15 ; Y = 18 ; Z = 3

N = 21
P = 2



$q = N/2pm = 21/12 = 1{,}75$ A. fraccionario

$t = 1$, $N/t = 21/1 = 21$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360/21 \cong 17° 8'$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 2/21 = 2\alpha$

$N/3 = 21/3 = 7$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 + 0{,}5 = 4$ positivos , $N/6 - 0{,}5 = 3$ negativos)

Condiciones de ejecución:

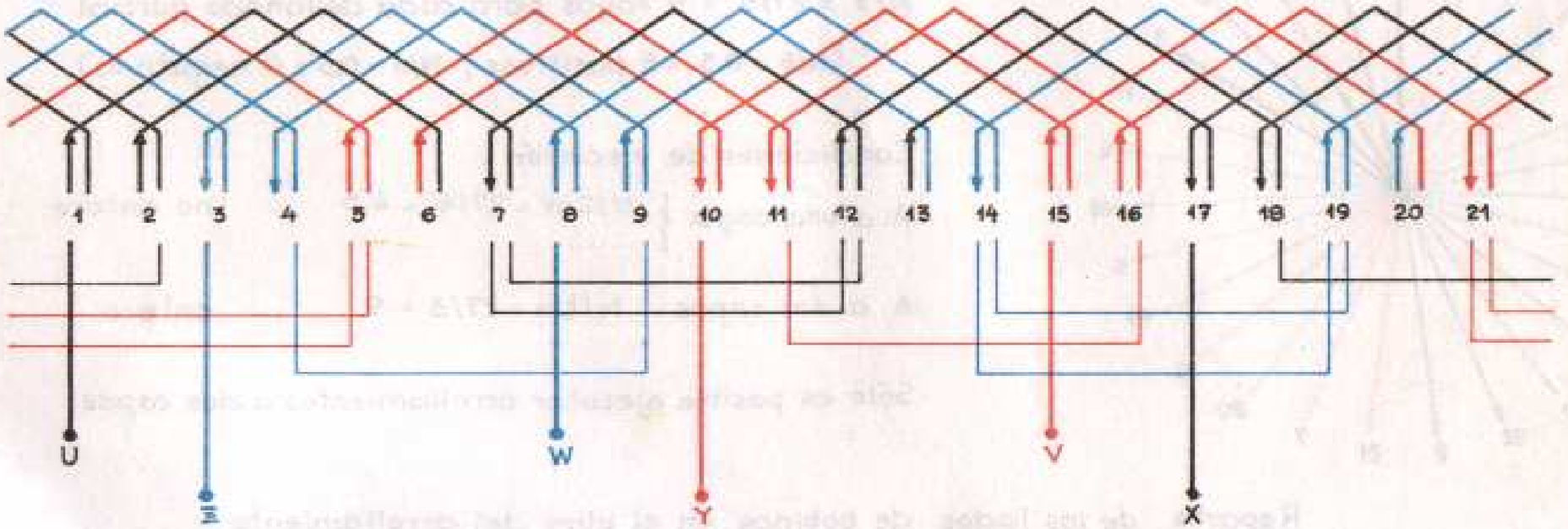
- A. a una capa: $N/2m = 21/6 = 3{,}5$, no entero
- A. a dos capas: $N/tm = 21/3 = 7$, entero

Sólo es posible ejecutar arrollamientos a dos capas

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

21 ranuras, 4 polos

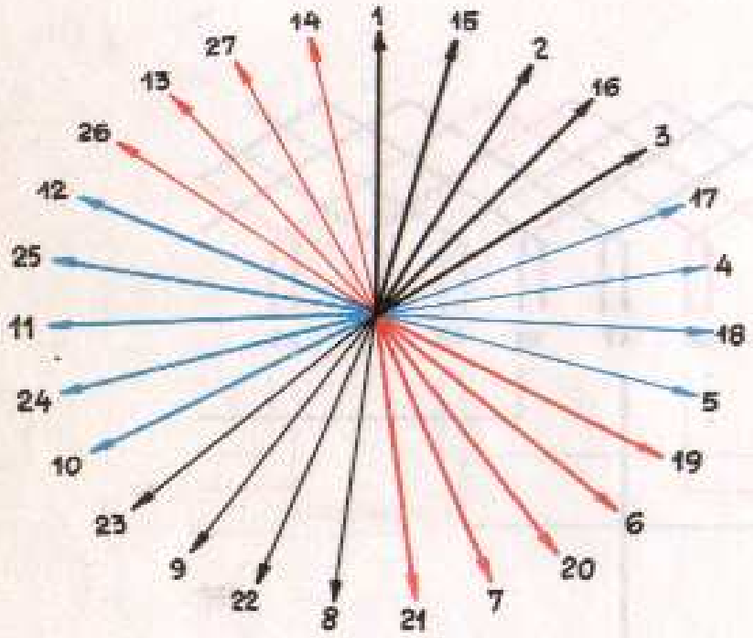
A. a dos capas, con paso acortado y = 1:6



Por fase: 3 grupos de 2 bobinas y 1 grupo de 1 bobina No conviene acortar más el paso

Terminales: $U = 1$; $V = 15$; $W = 8$
$X = 17$; $Y = 10$; $Z = 3$

N = 27
p = 2



$q = N/2pm = 27/12 = 2{,}25$ A. fraccionario

$t = 1$, $N/t = 27/1 = 27$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360t/N = 360/27 = 13° 20'$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 2/27 = 2\alpha$

$N/3 = 27/3 = 9$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 + 0{,}5 = 5$ positivos , $N/6 - 0{,}5 = 4$ negativos)

Condiciones de ejecución :

A. a una capa { $N/2m = 27/6 = 4{,}5$, no entero
.....

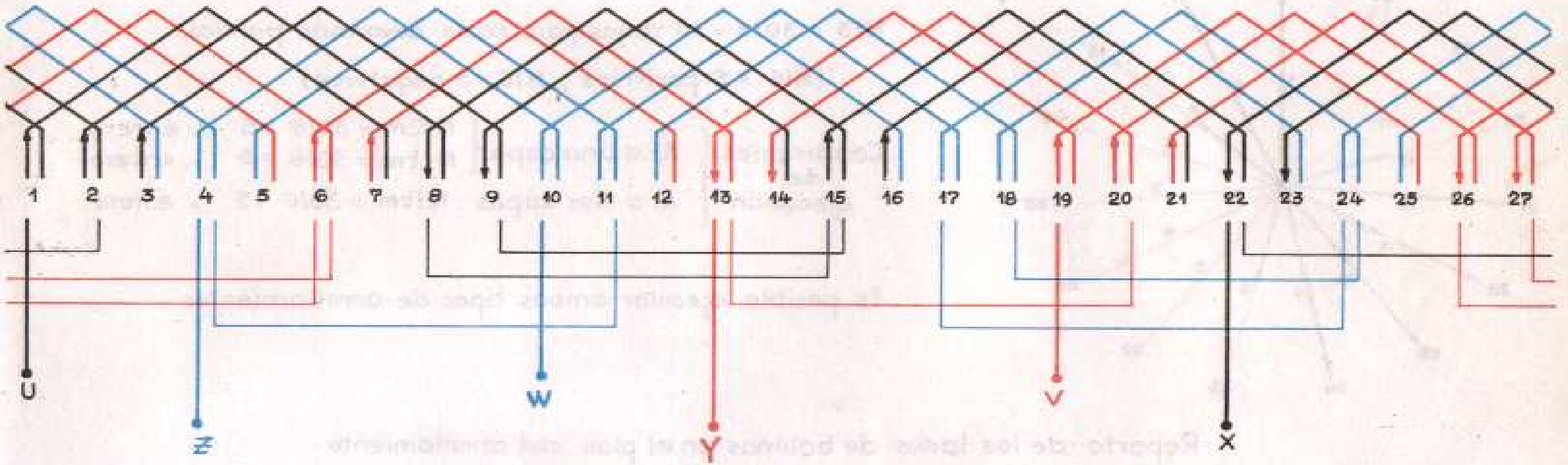
A. a dos capas: $N/tm = 27/3 = 9$, entero

Sólo es posible ejecutar arrollamientos a dos capas

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

27 ranuras, 4 polos

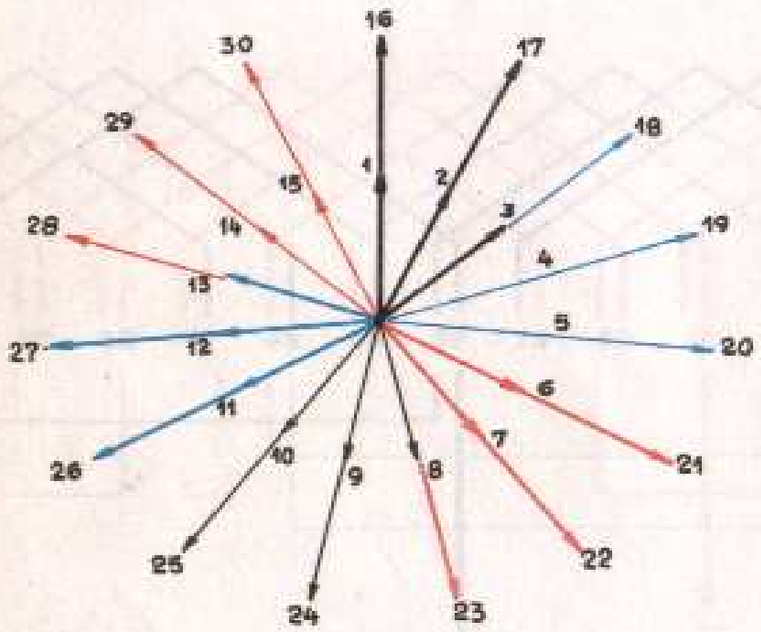
A. a dos capas, con paso acortado y = 1:7



Por fase: 1 grupo de 3 bobinas y 3 grupos de 2 bobinas. No conviene acortar más el paso

Terminales: U = 1 ; V = 19 ; W = 10
X = 22 ; Y = 13 ; Z = 4

N = 30
P = 2



$q = N/2pm = 30/12 = 2{,}5$ A. fraccionario

$t = 2$, $N/t = 30/2 = 15$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360 \times 2/30 = 24°$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 2/30 = \alpha$

$N/3 = 30/3 = 10$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 5$ positivos , $N/6 = 5$ negativos)

Condiciones de ejecución:

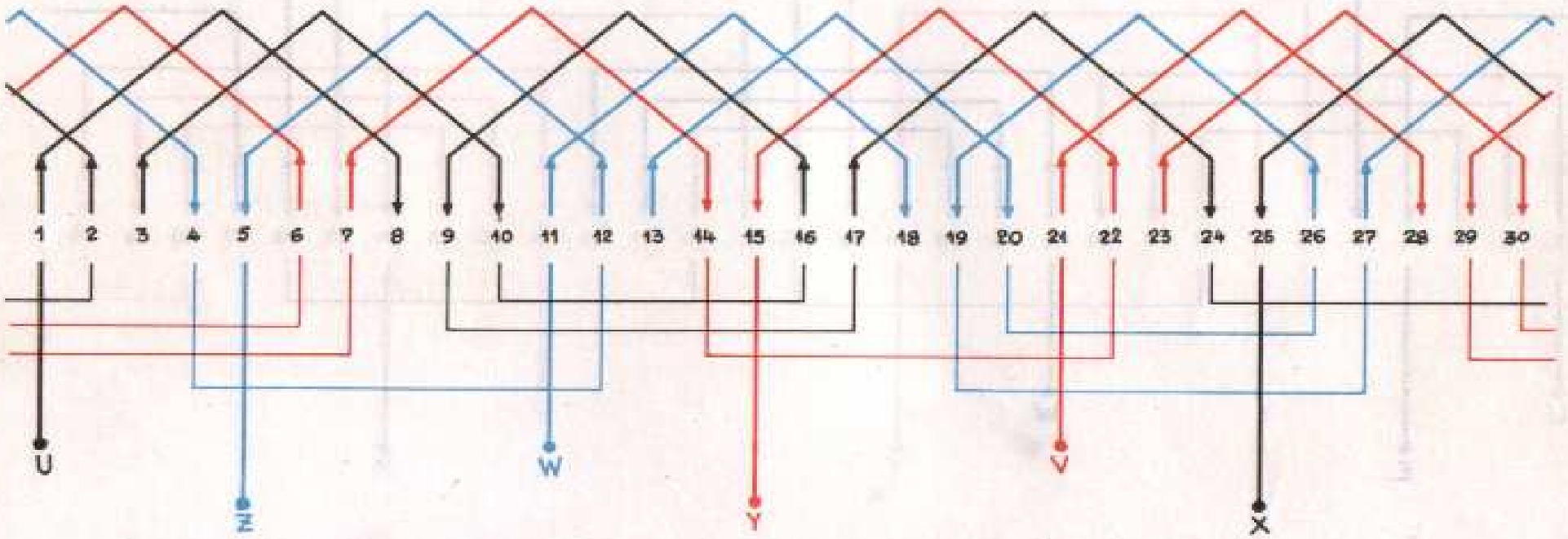
- A. a una capa:
  - $N/2m = 30/6 = 5$, entero
  - $N/tm = 30/6 = 5$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 30/6 = 5$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

30 ranuras, 4 polos

1) A. a una capa, con bobinas de paso constante

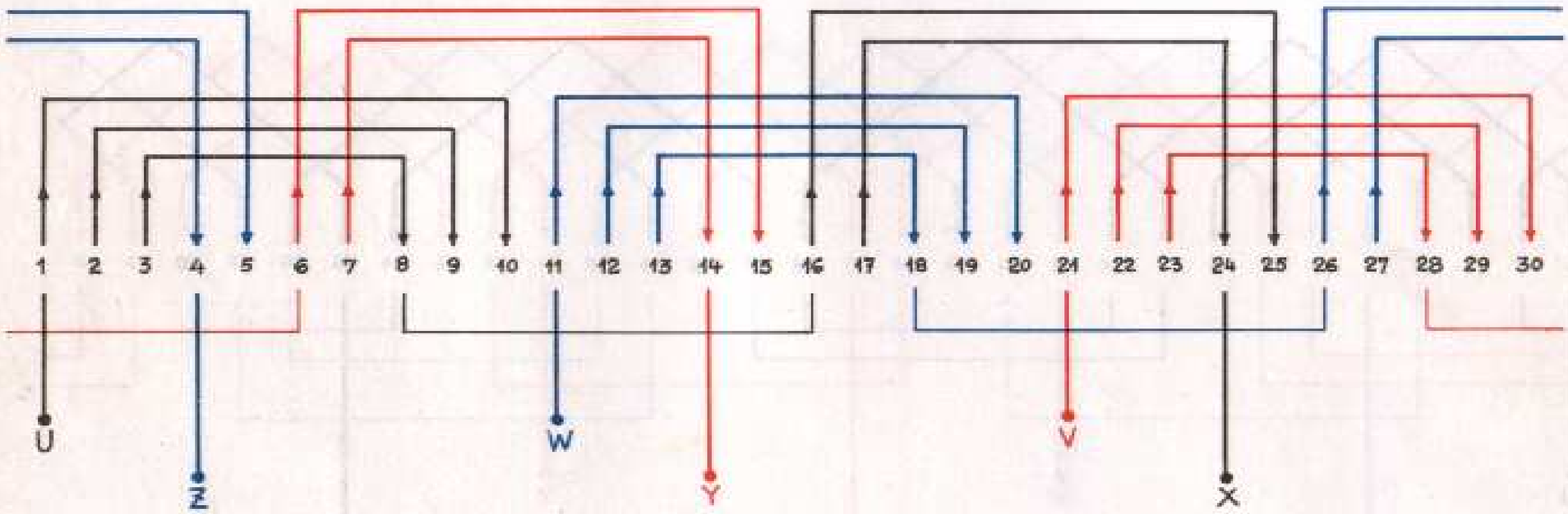


Por fase: 1 grupo de 2 bobinas (con una ranura intermedia) y 3 grupos de 1 bobina. Paso y = 1:8 (algo acortado)

Terminales: U = 1 ; V = 21 ; W = 11
X = 25 ; Y = 15 ; Z = 5

30 ranuras, 4 polos

2)A. a una capa, con cabezas de bobina en dos planos

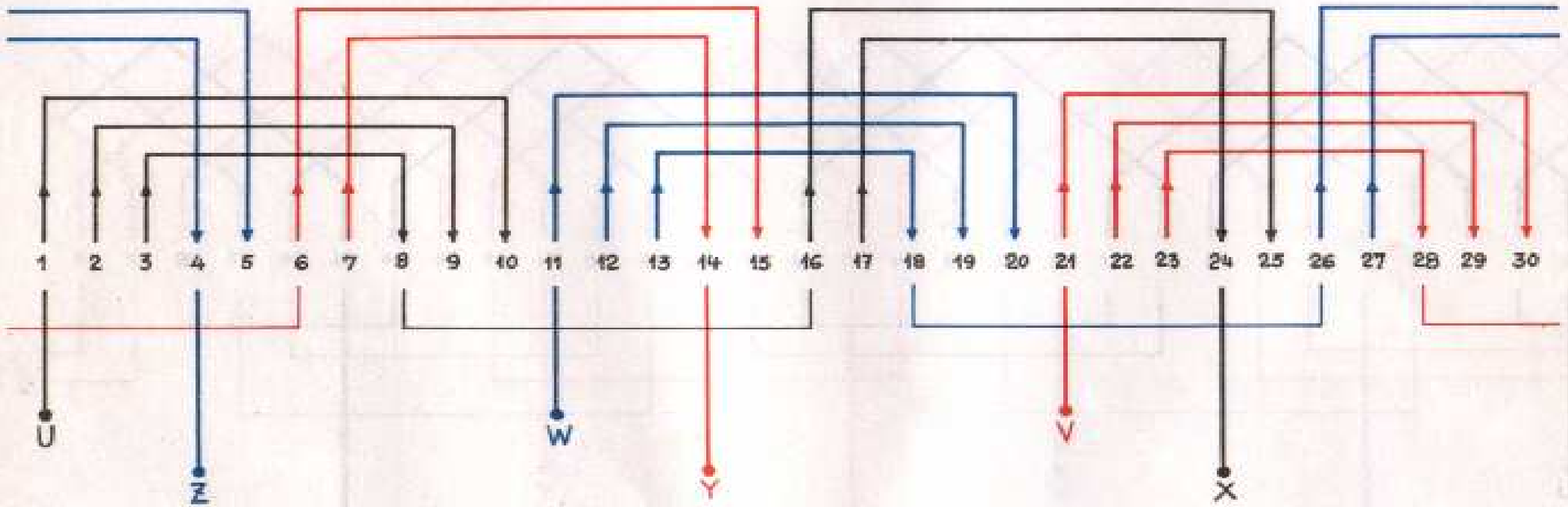


Por fase: 1 grupo de 3 bobinas (y = 1 : 6 : 8 : 10) y un grupo de 2 bobinas (y = 1 : 8 : 10)

Terminales : U = 1 ; V = 21 ; W = 11
X = 24 ; Y = 14 ; Z = 4

30 ranuras, 4 polos

2)A. a una capa, con cabezas de bobina en dos planos

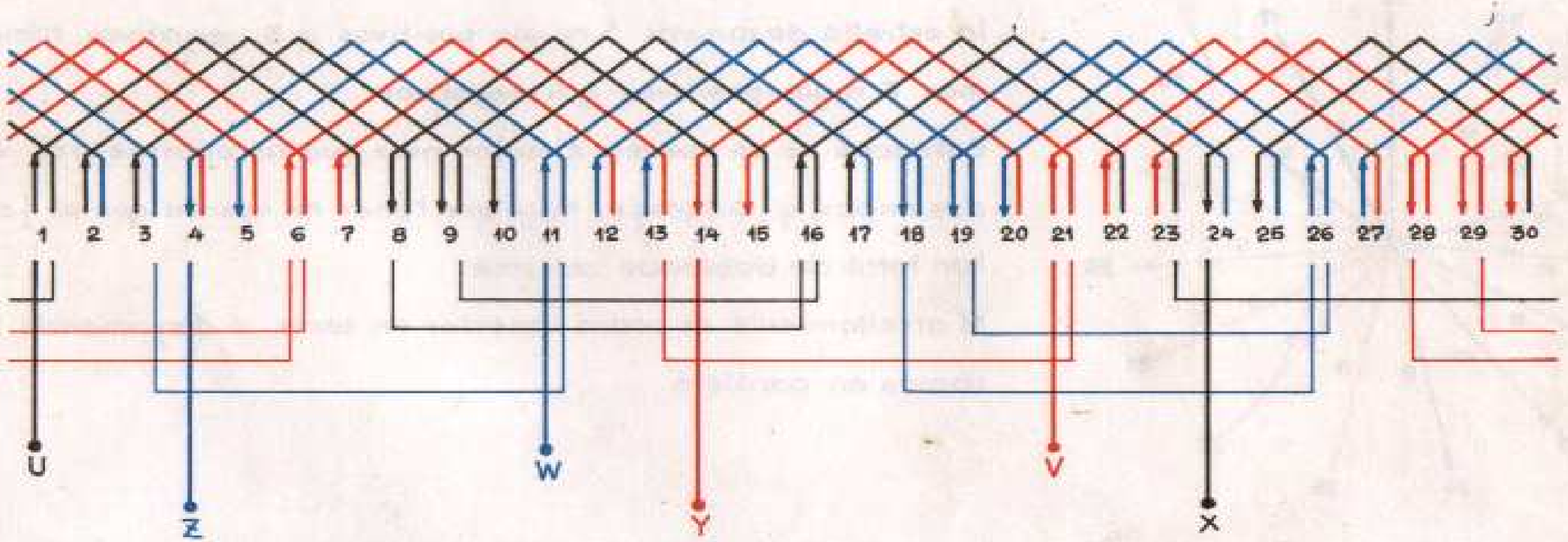


Por fase: 1 grupo de 3 bobinas (y = 1:6:8:10) y un grupo de 2 bobinas (y = 1:8:10)

Terminales : U = 1 ; V = 21 ; W = 11
X = 24 ; Y = 14 ; Z = 4

30 ranuras, 4 polos

3) A. a dos capas, con paso acortado y = 1:7

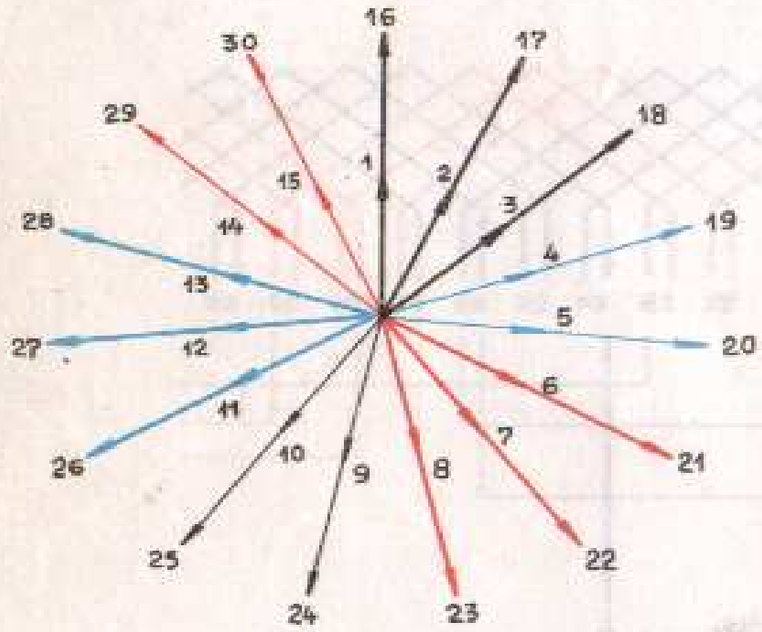


Por fase:

2 grupos de 3 bobinas y 2 grupos de 2 bobinas. No conviene acortar más el paso

Terminales: $U = 1$; $V = 21$; $W = 11$
$X = 24$; $Y = 14$; $Z = 4$

N = 30
p = 2



Modificación del reparto de rayos de la estrella

Para poder verificar conexiones en paralelo, en vez de tomar en la estrella de ranuras 5 rayos positivos y 5 negativos, tomamos 6 rayos positivos y 4 negativos.

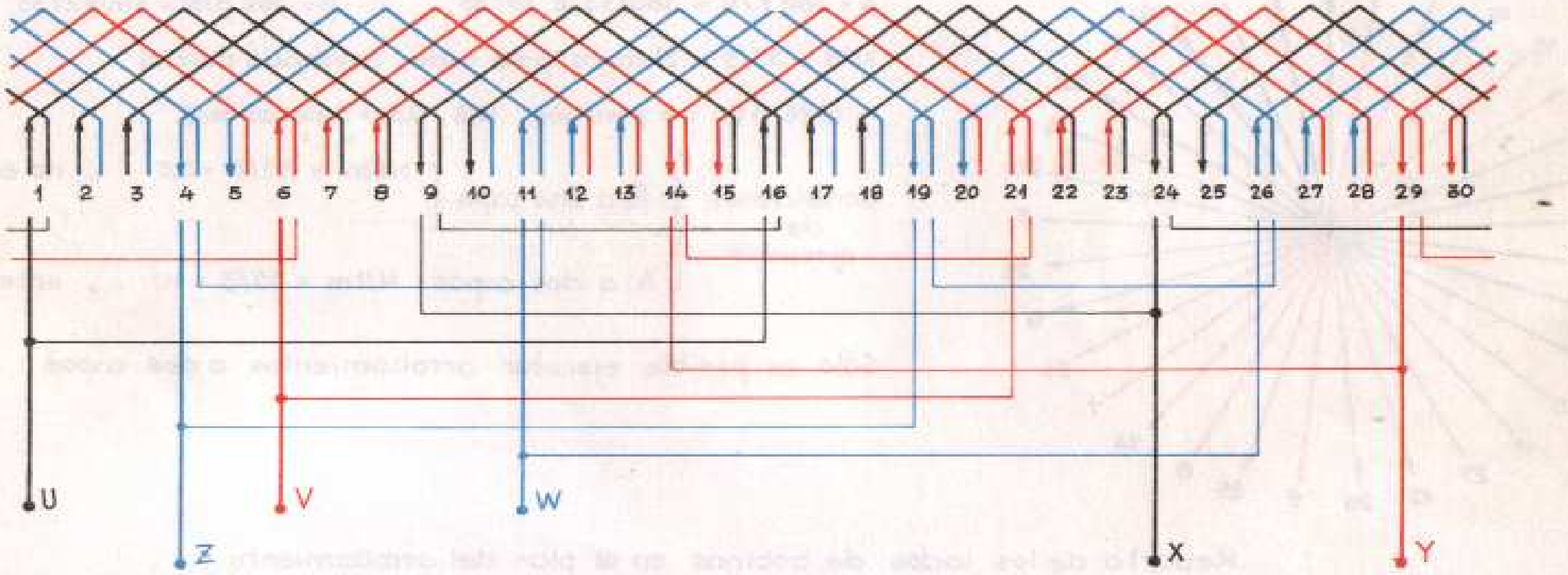
Entonces no se pueden ejecutar mas que arrollamientos a dos capas, y, además, hay que tener en cuenta que el factor total de bobinado decrece.

El arrollamiento se podrá conectar en serie, o disponiendo 2 ramas en paralelo.

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

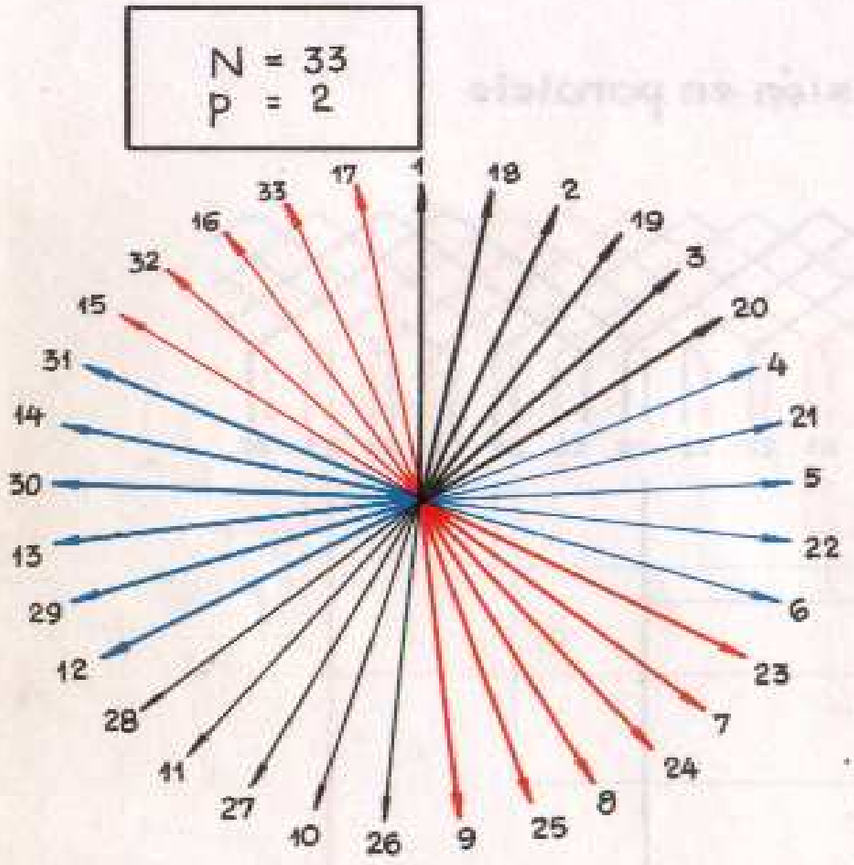
30 ranuras, 4 polos

A. a dos capas, con paso acortado y = 1:7 . Conexión en paralelo



Por fase: 2 grupos de 3 bobinas y 2 grupos de 2 bobinas. No conviene acortar más el paso

Terminales: U = 1 V = 6 ; W = 11
X = 24 ; Y = 29 ; Z = 4



$q = N/2pm = 33/12 = 2{,}75$ A. fraccionario

$t = 1$, $N/t = 33/1 = 33$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360/33 \cong 10^\circ 55'$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 2/33 = 2\alpha$

$N/3 = 33/3 = 11$ rayos para cada devanado parcial

$(N/6 + 0{,}5 = 6$ positivos, $N/6 - 0{,}5 = 5$ negativos)

Condiciones de ejecución:

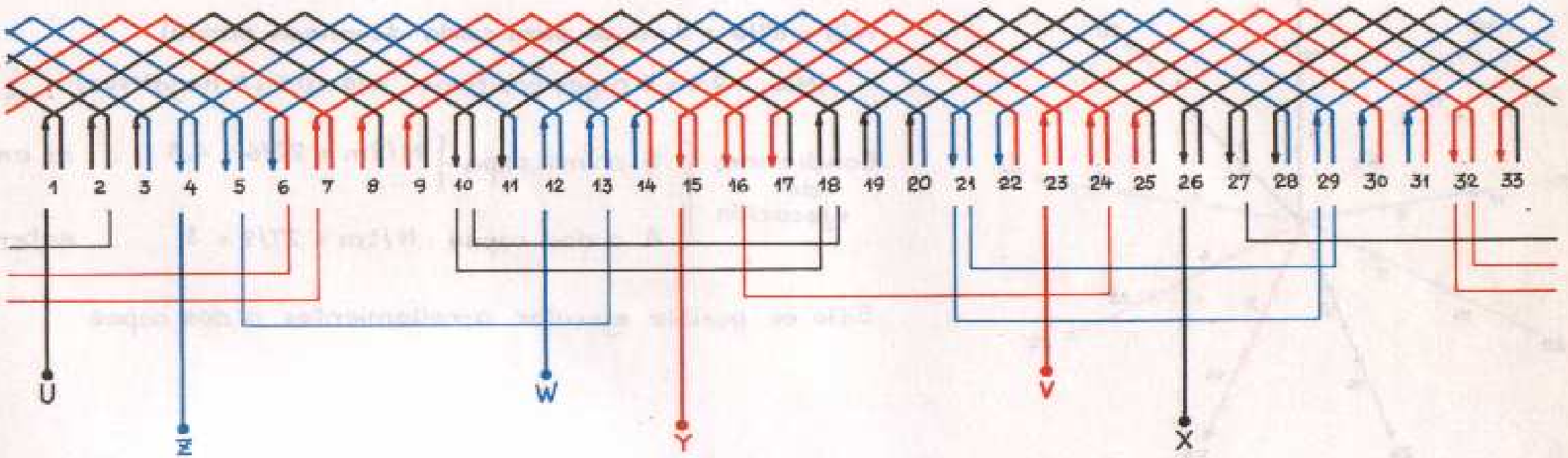
- A. a una capa: $N/2m = 33/6 = 5{,}5$, no entero
  - .....
- A. a dos capas: $N/tm = 33/3 = 11$, entero

Sólo es posible ejecutar arrollamientos a dos capas

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

33 ranuras, 4 polos

A. a dos capas, con paso acortado y = 1 : 8

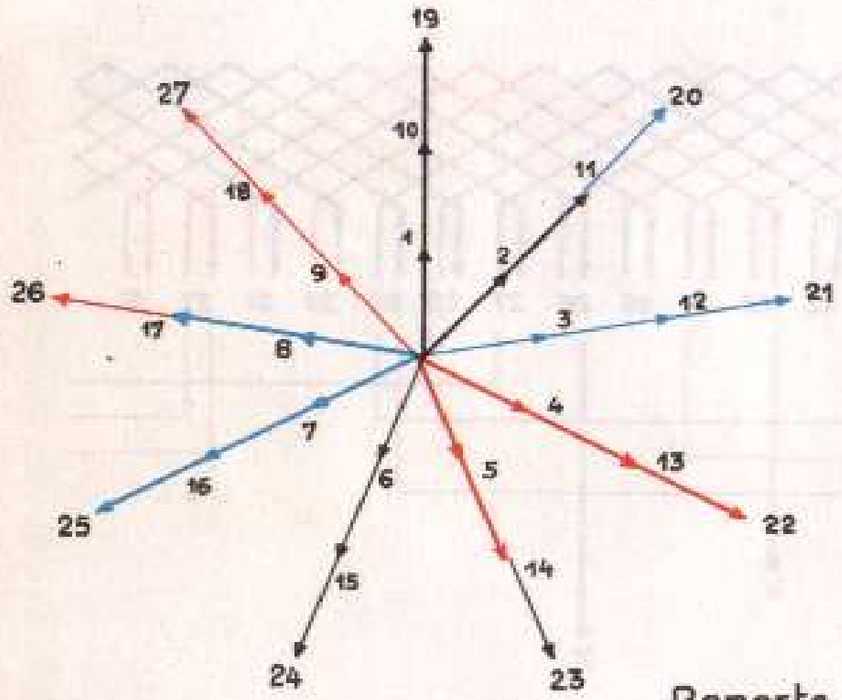


Por fase:

3 grupos de 3 bobinas y 1 grupo de 2 bobinas. No conviene acortar más el paso

Terminales : $U = 1$; $V = 23$; $W = 12$
$X = 26$; $Y = 15$; $Z = 4$

N = 27
p = 3



$q = N/2pm = 27/18 = 1{,}5$ A. fraccionario

$t = 3$, $N/t = 27/3 = 9$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360 \times 3/27 = 40°$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 3/27 = \alpha$

$N/3 = 27/3 = 9$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 + 0{,}5 = 5$ rayos positivos , $N/6 - 0{,}5 = 4$ negativos)

Condiciones de ejecución:

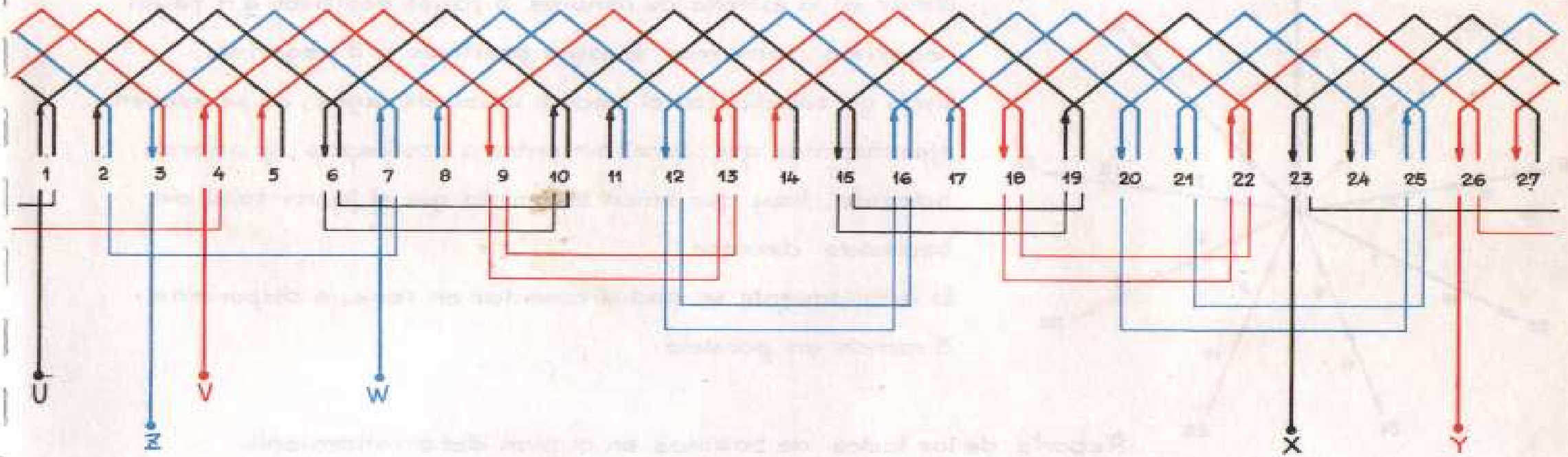
- A. a una capa: $N/2m = 27/6 = 4{,}5$, no entero
  .....
- A. a dos capas: $N/tm = 27/9 = 3$, entero

Sólo es posible ejecutar arrollamientos a dos capas

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

27 ranuras, 6 polos

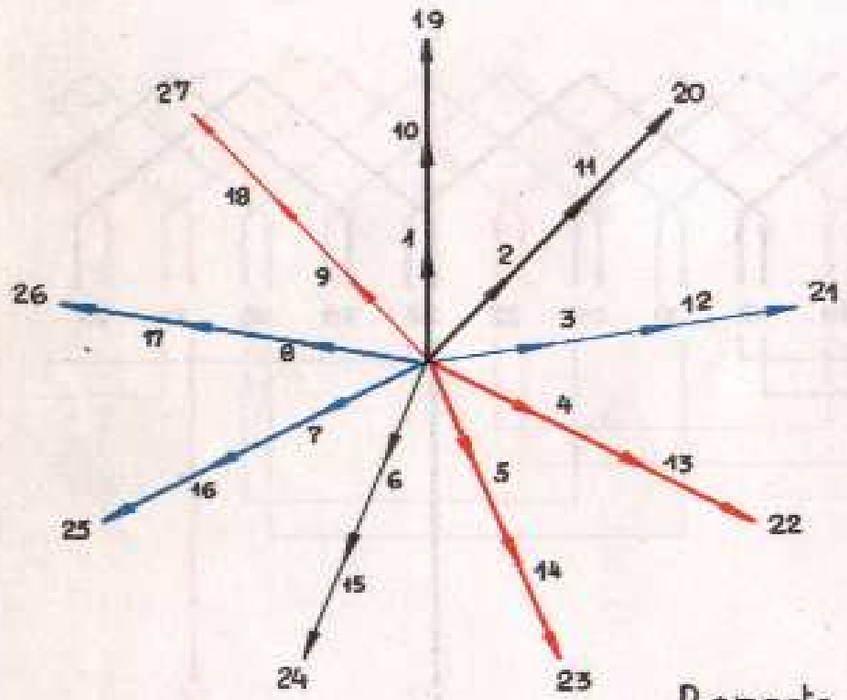
A. a dos capas, con paso acortado y = 1:5



Por fase : 3 grupos de 2 bobinas y 3 grupos de 1 bobina. No conviene acortar más el paso

Terminales : $U = 1$; $V = 4$; $W = 7$
$X = 23$; $Y = 26$; $Z = 3$

N = 27
p = 3



Modificación del reparto de rayos de la estrella

Para poder verificar conexiones en paralelo, en vez de tomar en la estrella de ranuras 5 rayos positivos y 4 rayos negativos, tomamos 6 rayos positivos y 3 negativos.

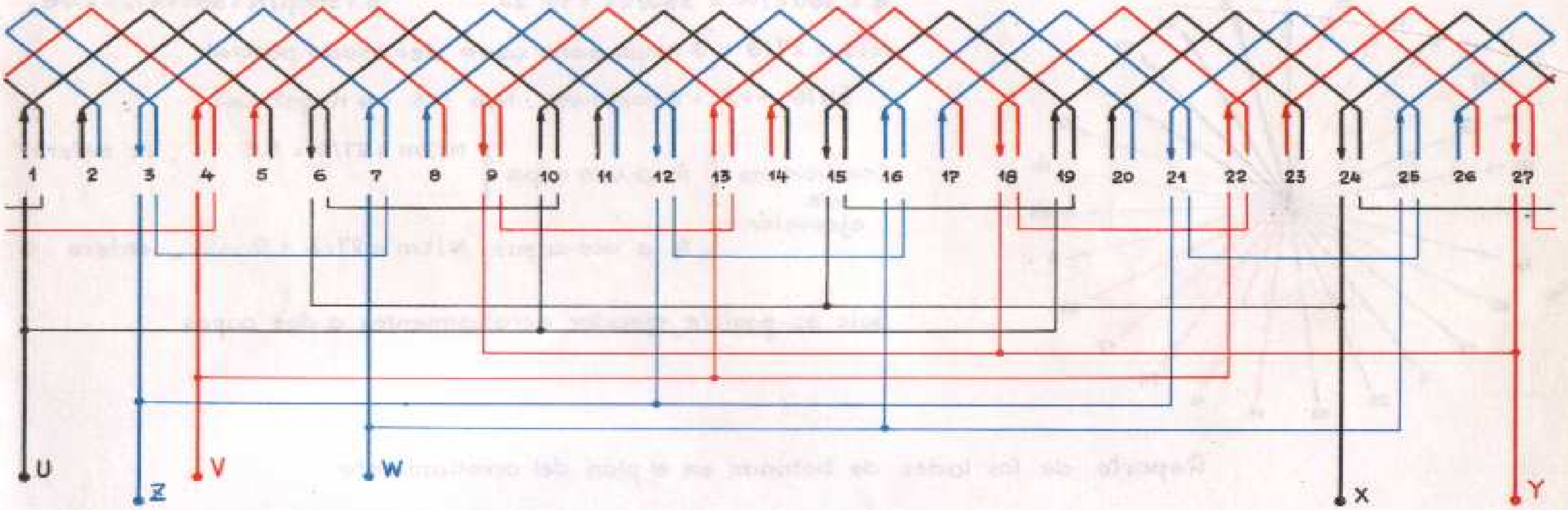
Como ya sucedía con el reparto usual de rayos, no se pueden ejecutar mas que arrollamientos a dos capas, y ahora, además, hay que tener en cuenta que el factor total de bobinado decrece

El arrollamiento se podrá conectar en serie, o disponiendo 3 ramas en paralelo.

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

27 ranuras, 6 polos

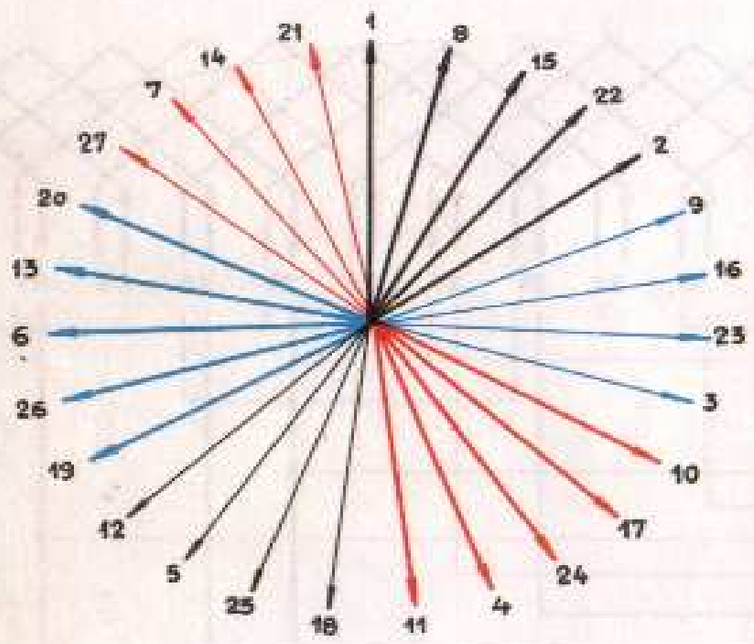
A. a dos capas, con paso acortado y = 1:5. Conexión en paralelo



Por fase: 3 grupos de 2 bobinas y 3 grupos de 1 bobina. No conviene acortar más el paso

Terminales: $U = 1$; $V = 4$; $W = 7$
$X = 24$; $Y = 27$; $Z = 3$

N = 27
p = 4



$q = N/2pm = 27/24 = 1{,}125$ A. fraccionario

$t = 1$, $N/t = 27/1 = 27$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360/27 = 13° 20'$ $\beta = 360p/N = 360 \times 4/27 = 4\alpha$

$N/3 = 27/3 = 9$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 + 0{,}5 = 5$ positivos , $N/6 - 0{,}5 = 4$ negativos)

Condiciones de ejecución:

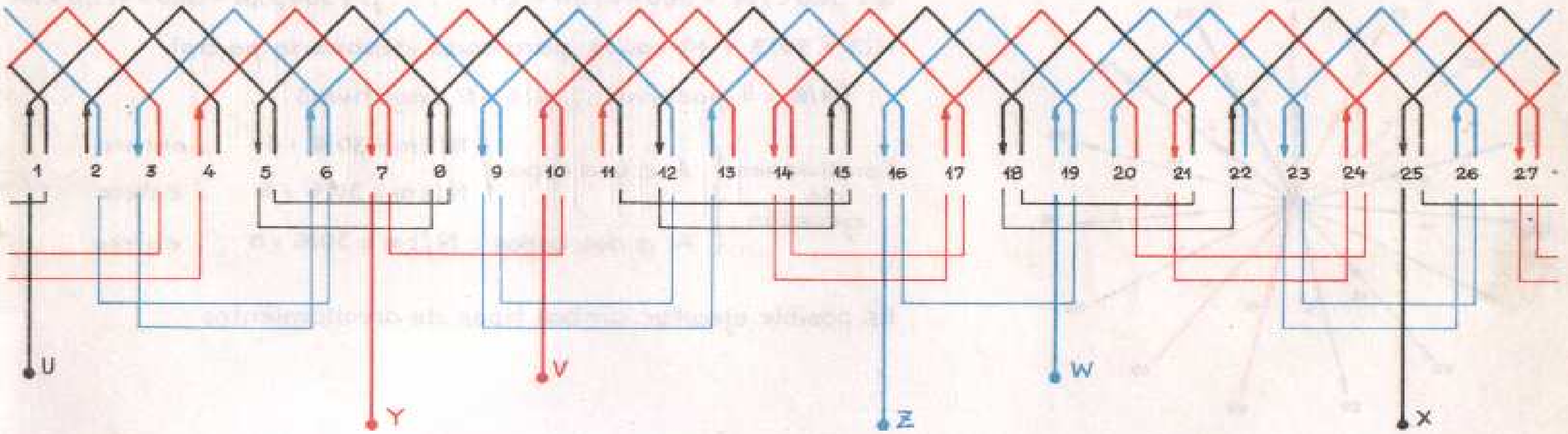
- A. a una capa: $N/2m = 27/6 = 4{,}5$, no entero
  - .....
- A. a dos capas: $N/tm = 27/3 = 9$, entero

Sólo es posible ejecutar arrollamientos a dos capas

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

27 ranuras, 8 polos

A. a dos capas, con paso acortado y = 1:4

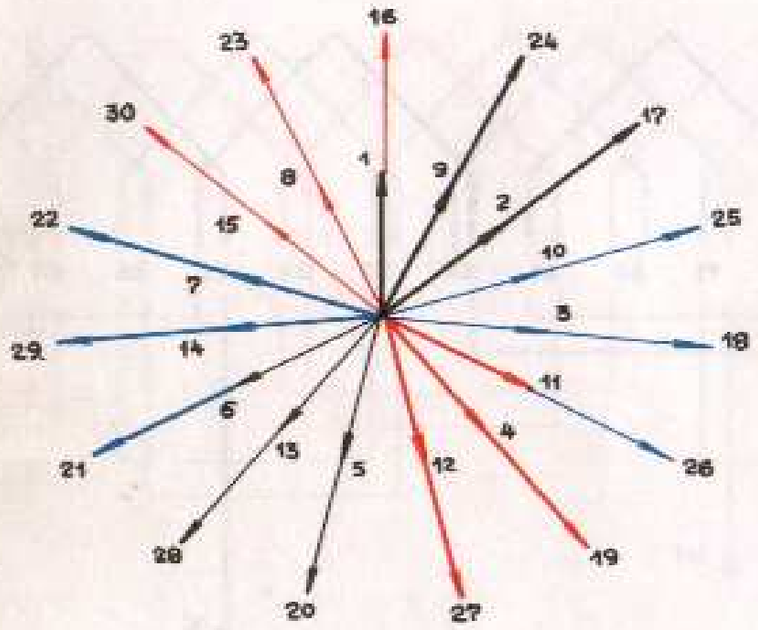


Por fase:

1 grupo de 2 bobinas y 7 grupos de 1 bobina. No conviene acortar más el paso

Terminales : U = 1 ; V = 10 ; W = 19
X = 25 ; Y = ? ; Z = 16

N = 30
p = 4



$q = N/2pm = 30/24 = 1{,}25$ A. fraccionario

$t = 2$, $N/t = 30/2 = 15$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360 \times 2/30 = 24°$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 4/30 = 2\alpha$

$N/3 = 30/3 = 10$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 5$ positivos , $N/6 = 5$ negativos)

Condiciones de ejecución:

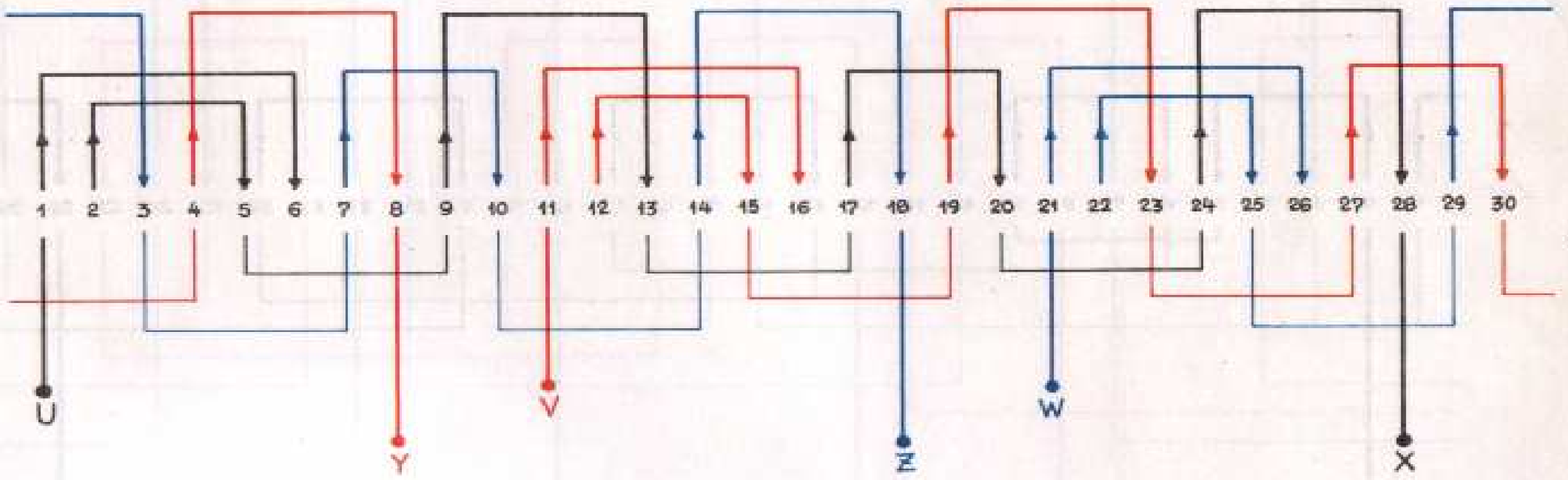
- A. a una capa:
  - $N/2m = 30/6 = 5$, entero
  - $N/tm = 30/6 = 5$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 30/6 = 5$, entero

Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

30 ranuras, 8 polos

1) A. a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos

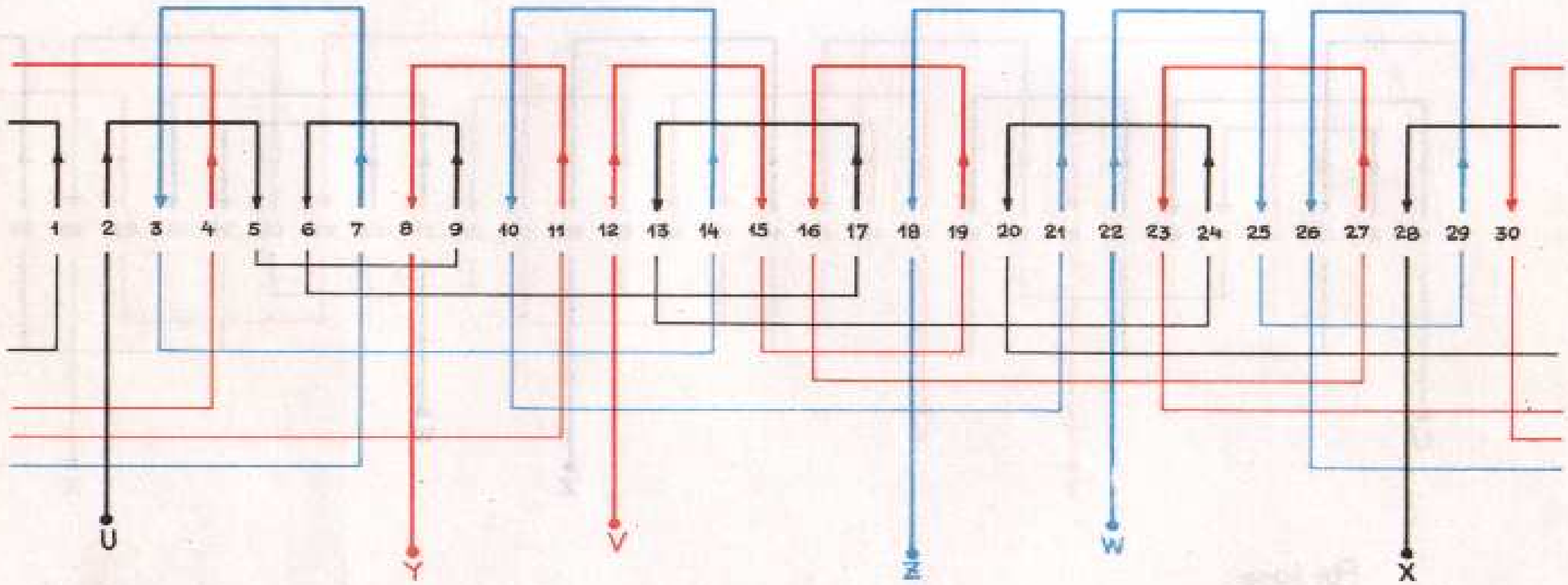


Por fase:

1 grupo de 2 bobinas (paso y=1:4:6), 2 grupos de 1 bobina (paso y=1:5) y 1 grupo de 1 bobina (paso y=1:4). Terminales: U = 1 ; V = 11 ; W = 21
X = 28 ; Y = 8 ; Z = 18

30 ranuras, 8 polos

2) A. a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos

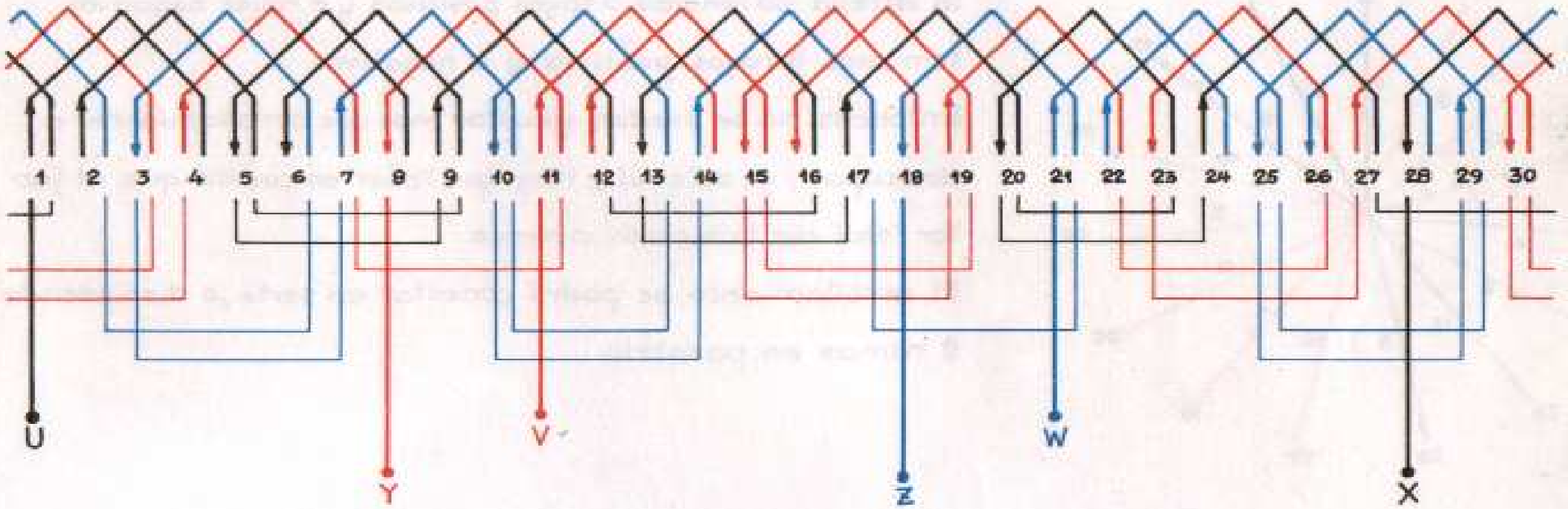


Por fase: 3 grupos de 1 bobina (paso y = 1:4) y 2 grupos de 1 bobina (paso y = 1:5)

Terminales : $U = 2$; $V = 12$; $W = 22$
$X = 28$; $Y = 8$; $Z = 18$

30 ranuras, 8 polos

3) A. a dos capas, con paso acortado y = 1:4

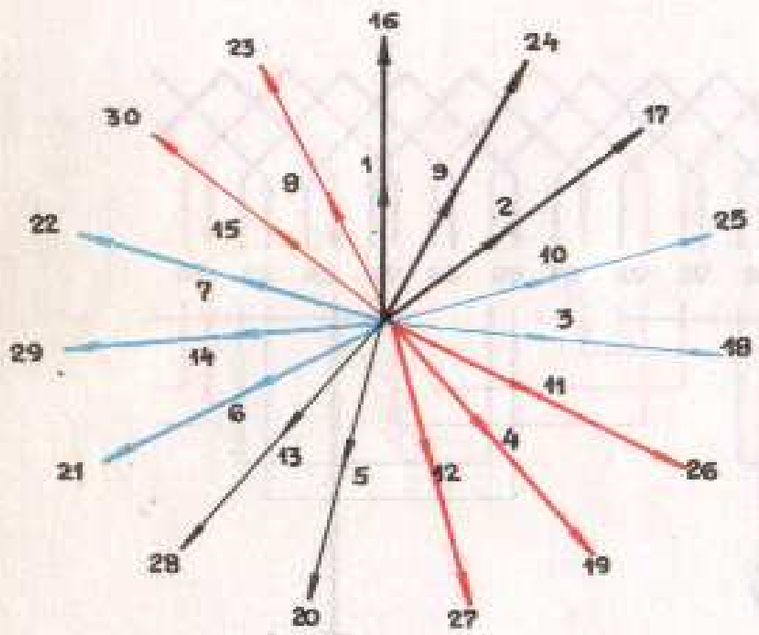


Por fase:

2 grupos de 2 bobinas, y 6 grupos de 1 bobina. No se puede acortar más el paso

Terminales : $U = 1$; $V = 11$; $W = 21$
$X = 28$; $Y = 8$; $Z = 18$

N = 30
P = 4



Modificación del reparto de rayos de la estrella

Para poder verificar conexiones en paralelo, en vez de tomar en la estrella de ranuras 5 rayos positivos y 5 rayos negativos, tomamos 6 rayos positivos y 4 negativos.

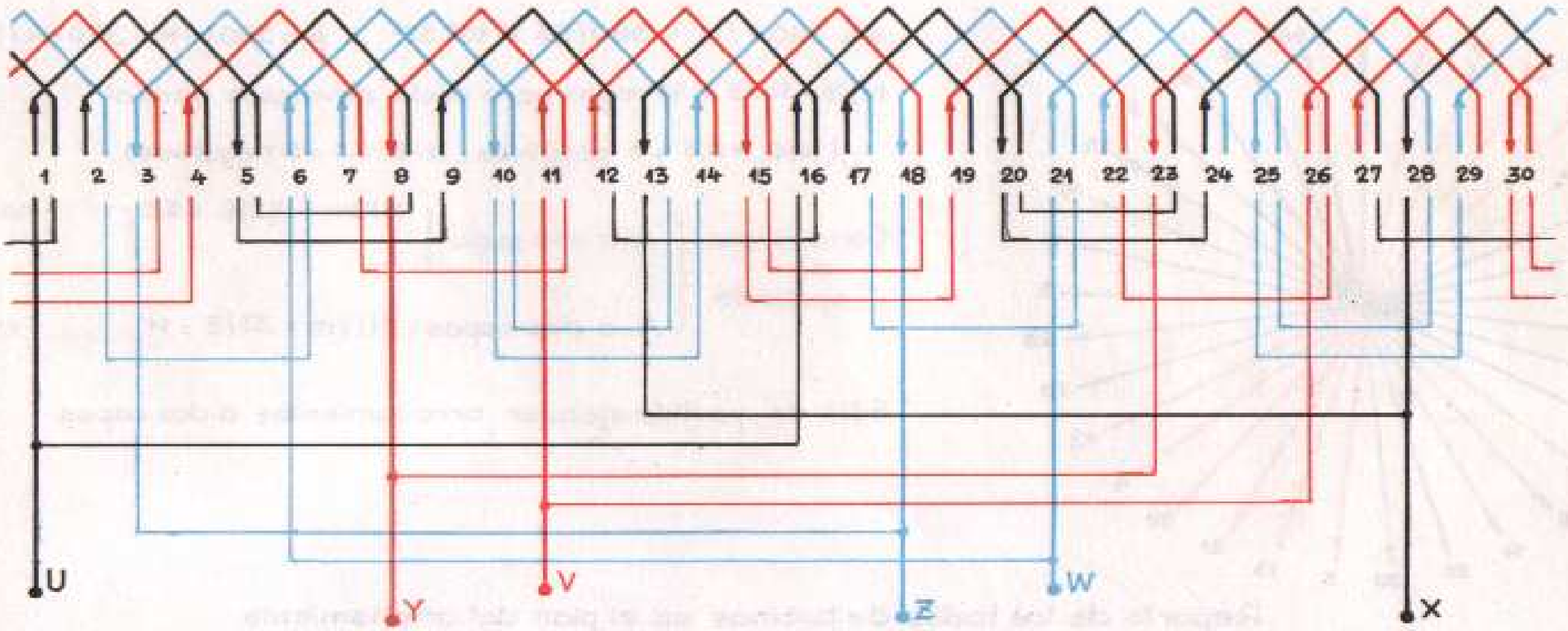
Entonces no se pueden ejecutar mas que arrollamientos a dos capas, y, además, hay que tener en cuenta que el factor total de bobinado decrece.

El arrollamiento se podrá conectar en serie, o disponiendo 2 ramas en paralelo.

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

30 ranuras, 8 polos

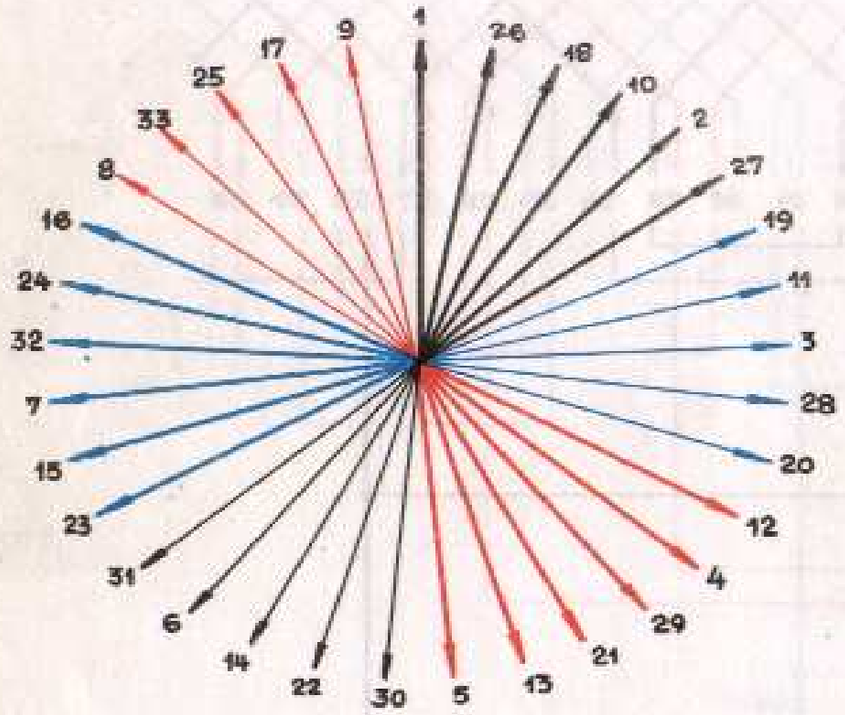
A. a dos capas, con paso acortado y = 1:4. Conexión en paralelo



Por fase: 2 grupos de 2 bobinas, y 6 grupos de 1 bobina. No se puede acortar más el paso

Terminales: U = 1 ; V = 11 ; W = 21
X = 28 ; Y = 8 ; Z = 18

N = 33
P = 4



$q = N/2pm = 33/24 = 1{,}375$ A. fraccionario

$t = 1$, $N/t = 33/1 = 33$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360/33 \cong 10°\,55'$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 4/33 = 4\alpha$

$N/3 = 33/3 = 11$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 + 0{,}5 = 6$ positivos , $N/6 - 0{,}5 = 5$ negativos)

Condiciones de ejecución:

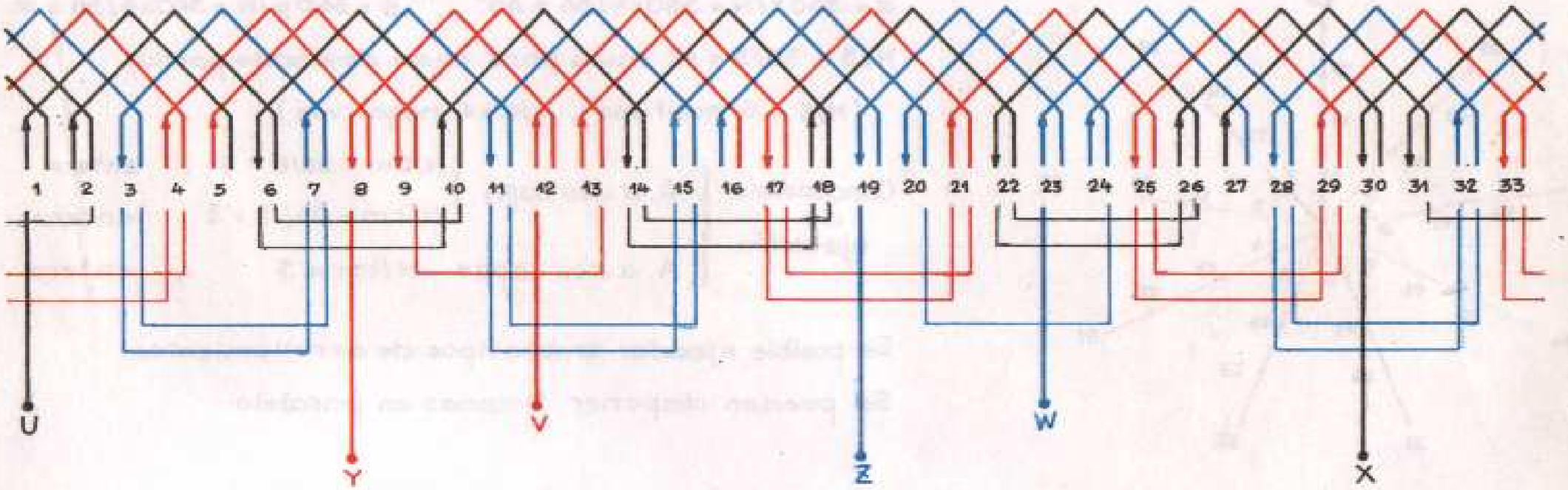
- A. a una capa: $N/2m = 33/6 = 5{,}5$, no entero
  - .....
- A. a dos capas: $N/tm = 33/3 = 11$, entero

Sólo es posible ejecutar arrollamientos a dos capas

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

33 ranuras , 8 polos

A. a dos capas, con paso acortado y= 1:5

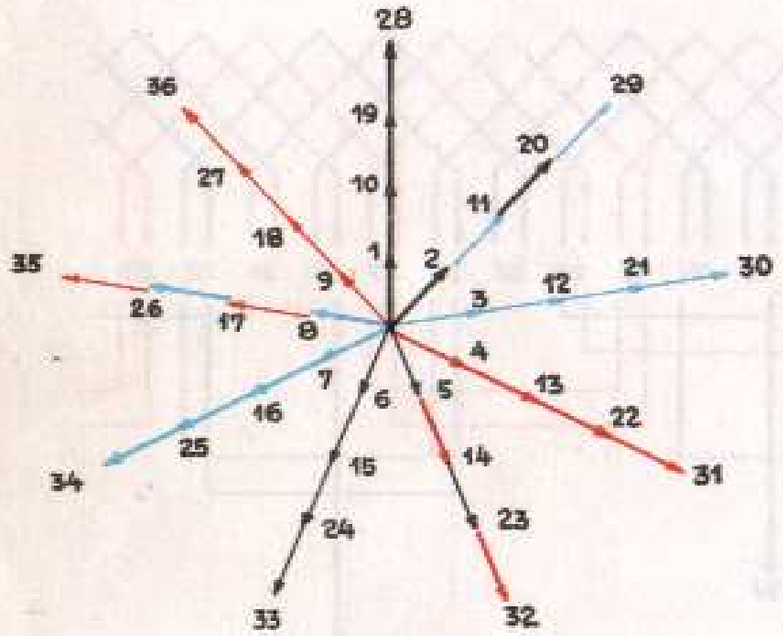


Por fase:

3 grupos de 2 bobinas y 5 grupos de 1 bobina. No conviene acortar más el paso

Terminales: $U = 1$; $V = 12$; $W = 23$
$X = 30$; $Y = 8$; $Z = 19$

N = 36
P = 4



$q = N/2pm = 36/24 = 1{,}5$ A. fraccionario

$t = 4$, $N/t = 36/4 = 9$ rayos no superpuestos

$\alpha = 360\,t/N = 360 \times 4/36 = 40°$, $\beta = 360\,p/N = 360 \times 4/36 = \alpha$

$N/3 = 36/3 = 12$ rayos para cada devanado parcial

($N/6 = 6$ positivos , $N/6 = 6$ negativos)

Condiciones de ejecución:

- A. a una capa:
  - $N/2m = 36/6 = 6$, entero
  - $N/tm = 36/12 = 3$, entero
- A. a dos capas: $N/tm = 3$, entero

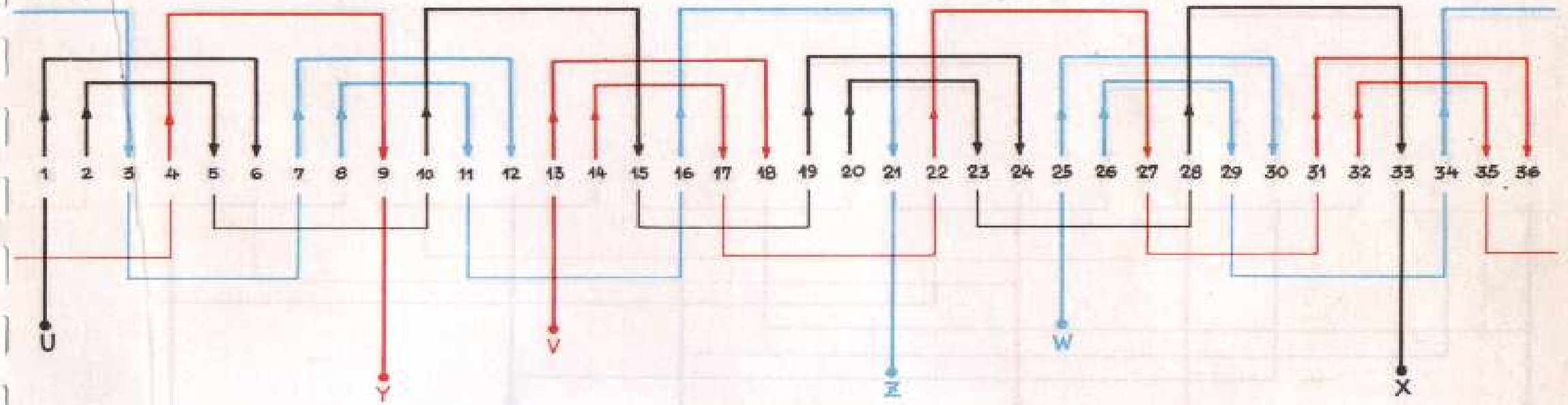
Es posible ejecutar ambos tipos de arrollamientos.

Se pueden disponer 2 ramas en paralelo

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

36 ranuras, 8 polos

1) A. a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos



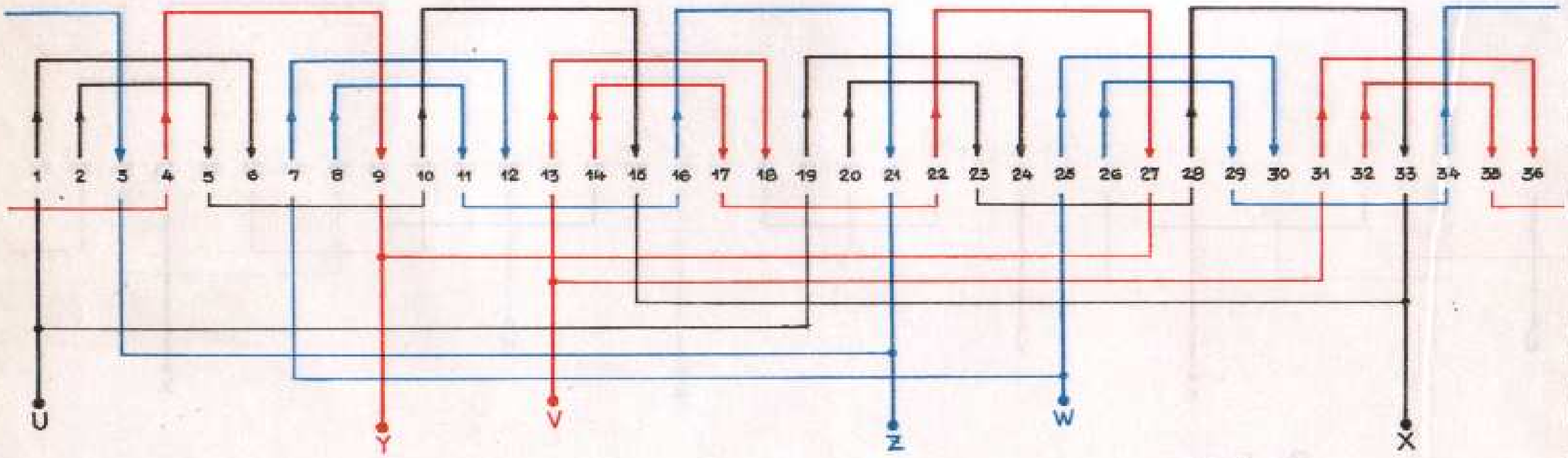
Por fase:

2 grupos de 2 bobinas (paso y = 1:4:6), y 2 grupos de 1 bobina (paso y = 1:6)

Terminales: U = 1 ; V = 13 ; W = 25
X = 33 ; Y = 9 ; Z = 21

36 ranuras, 8 polos

2) A. a una capa, con cabezas de bobinas en dos planos. Conexión en paralelo

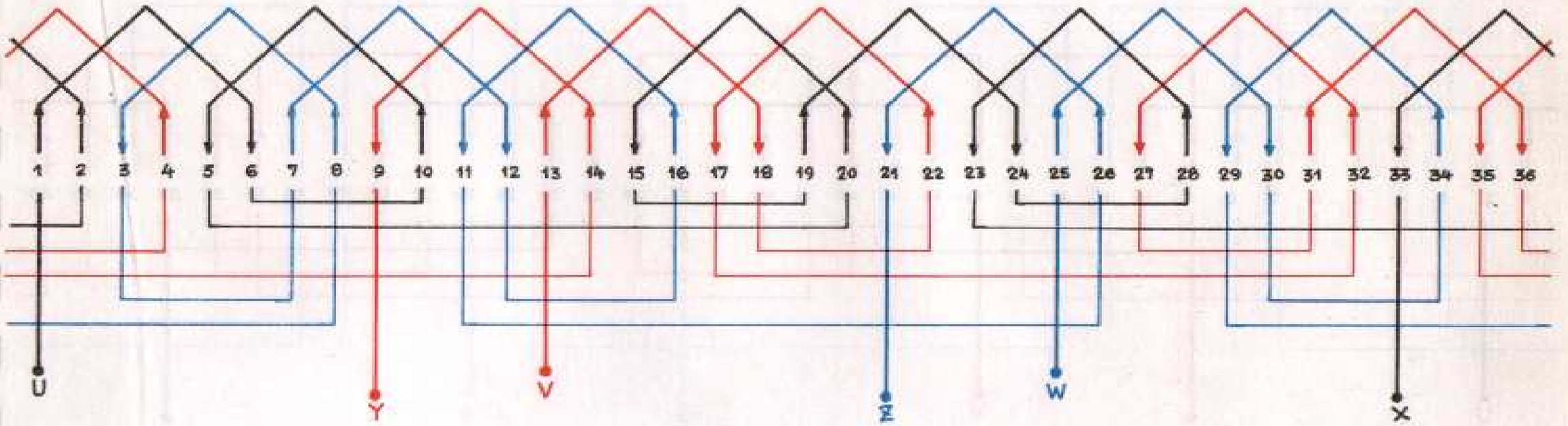


Por fase: 2 grupos de 2 bobinas (paso y = 1:4:6), y 2 grupos de 1 bobina (paso y = 1:6). 2 ramas en paralelo

Terminales : $U = 1$; $V = 13$; $W = 25$
$X = 33$; $Y = 9$; $Z = 21$

36 ranuras, 8 polos

3) A. a una capa, con bobinas de paso constante, y = 1:6



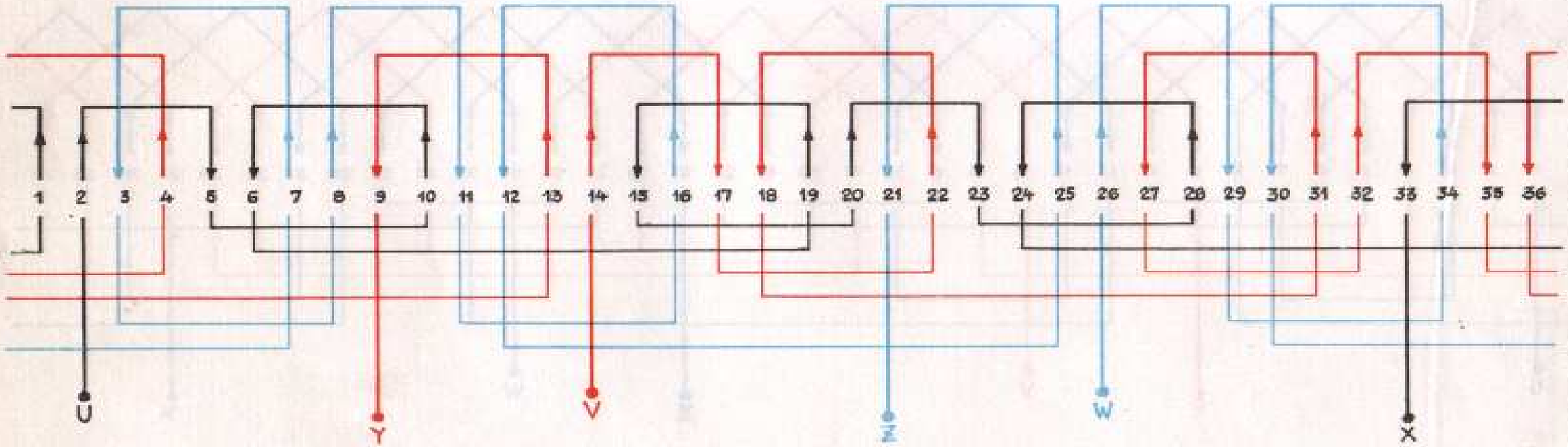
Por fase :

6 grupos de 1 bobina. Paso y = 1:6 (algo alargado)

Terminales : U = 1 ; V = 13 ; W = 25
X = 33 ; Y = 9 ; Z = 21

36 ranuras, 8 polos

4) A. a una capa, con cabezas de bobinas en tres planos



Por fase:

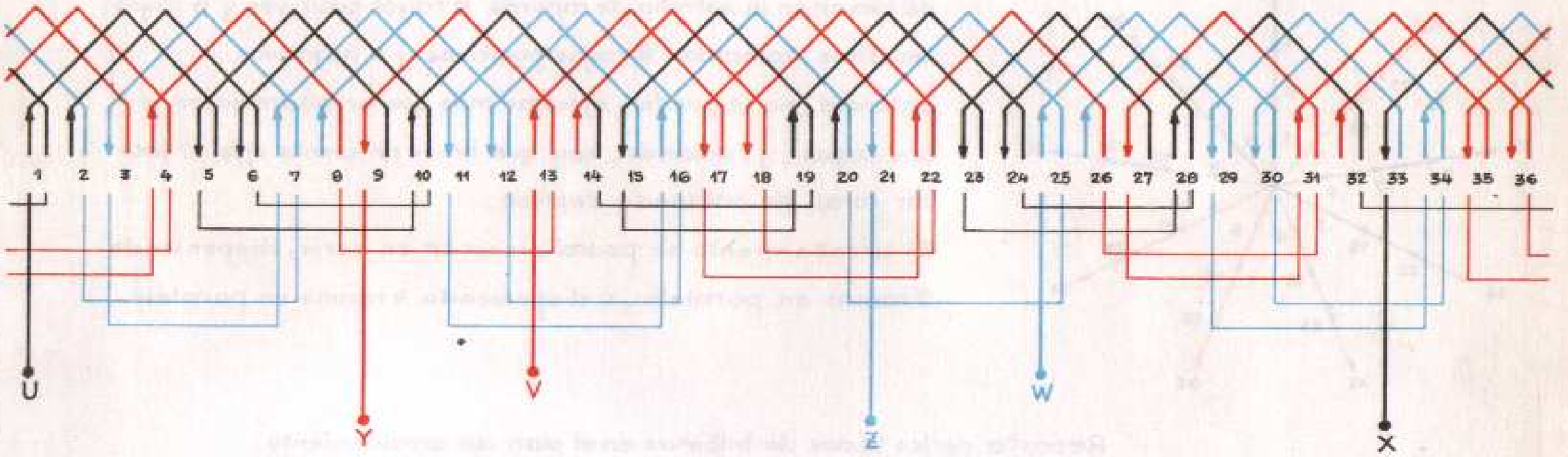
2 grupos de 1 bobina (paso y = 1:4) y 4 grupos de 1 bobina (paso y = 1:5)

Terminales: $U = 2$; $V = 14$; $W = 26$
$X = 33$; $Y = 9$; $Z = 21$

"Seifo-Handdruck"

36 ranuras, 8 polos

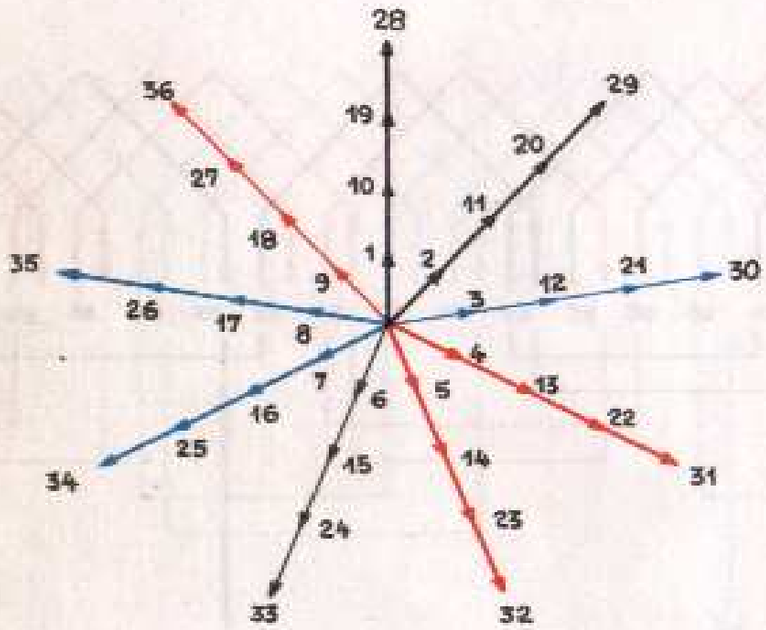
5) A. a dos capas, con paso acortado y = 1:5



Por fase: 4 grupos de 2 bobinas, y 4 grupos de 1 bobina. No conviene acortar más el paso

Terminales: U = 1 ; V = 13 ; W = 25
X = 33 ; Y = 9 ; Z = 21

N = 36
P = 4



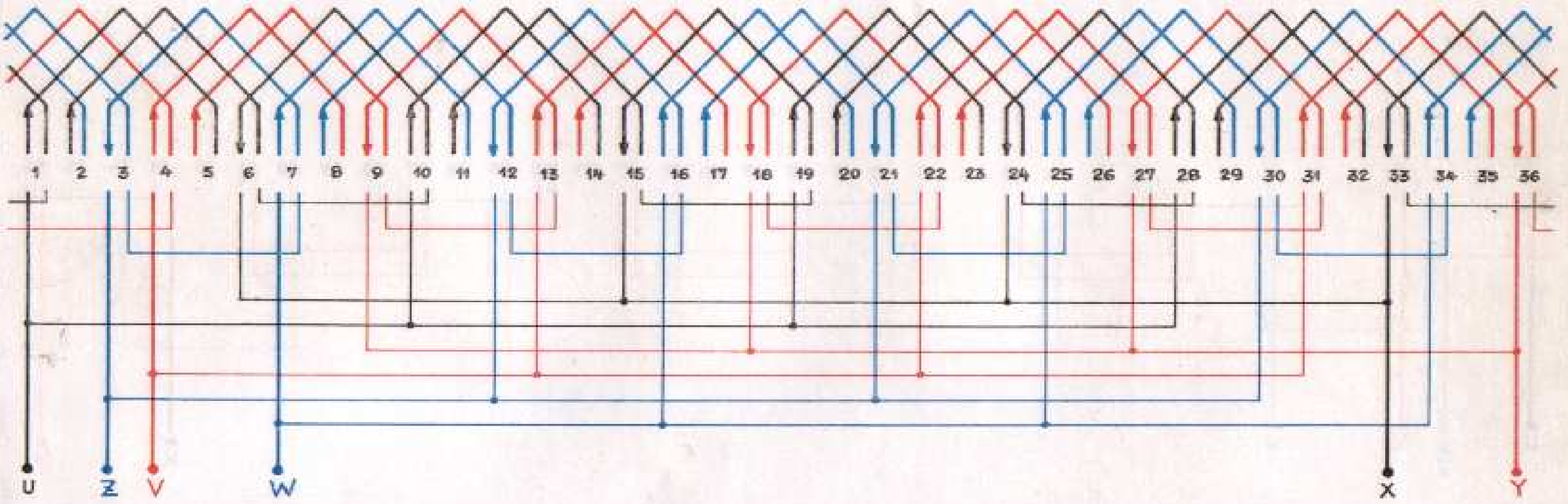
Modificación del reparto de rayos de la estrella

Para poder disponer de más de 2 ramas en paralelo, en vez de tomar en la estrella de ranuras 6 rayos positivos y 6 rayos negativos, tomamos 8 rayos positivos y 4 negativos.
Entonces, no se pueden ejecutar mas que arrollamientos a dos capas, y, además, hay que tener en cuenta que el factor total de bobinado decrece.
El arrollamiento se podrá conectar en serie, disponiendo 2 ramas en paralelo, o disponiendo 4 ramas en paralelo.

Reparto de los lados de bobinas en el plan del arrollamiento

36 ranuras, 8 polos

A. a dos capas, con paso acortado y=1:5. Conexión con 4 ramas en paralelo

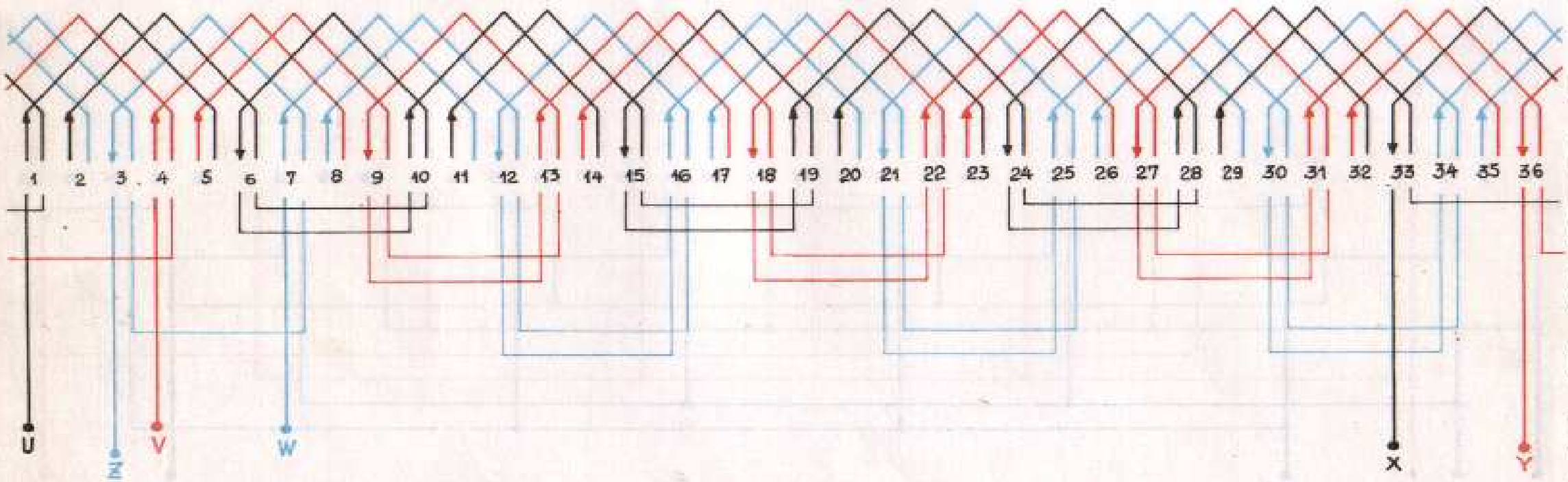


Por fase: 4 grupos de 2 bobinas, y 4 grupos de 1 bobina. No conviene acortar más el paso

Terminales: $U = 1$; $V = 4$; $W = 7$
$X = 33$; $Y = 36$; $Z = 3$

36 ranuras, 8 polos

A. a dos capas, con paso acortado y=1:5. Conexión en serie



Por fase: 4 grupos de 2 bobinas, y 4 grupos de 1 bobina. No conviene acortar más el paso

Terminales: U = 1 ; V = 4 ; W = 7
X = 33 ; Y = 36 ; Z = 3

III. ARROLLAMIENTOS MIXTOS TRIFASICOS

A continuación se exponen los planes de arrollamientos mixtos trifásicos de varios casos que se ejecutan frecuentemente en los talleres de bobinado.

En general los arrollamientos mixtos se realizan porque las condiciones particulares del taller de bobinado, o las exigencias de ejecución de arrollamientos sencillos para motores de los que se fabrican grandes series, así lo requieren. Las ventajas que se obtienen con los arrollamientos mixtos son, pues, esencialmente en cuanto a la ejecución e inserción de las bobinas.

La característica que define los arrollamientos mixtos es la de que sus bobinas, al contrario que en los arrollamientos a una y a dos capas, no constan todas del mismo número de espiras.

Aquí consideraremos solamente los arrollamientos mixtos formados por bobinas que llevan unas doble número de espiras que las otras.

Unas veces, pues, algunas de las ranuras quedarán llenas con las espiras de un solo lado de bobina, y otras ranuras, en cambio, albergarán dos lados de bobinas diferentes, de aquellas que llevan la mitad de espiras que las otras. Por ello, los arrollamientos mixtos presentan, a la vez, características de los arrollamientos a una capa y de los arrollamientos a dos capas. Para dibujar el plan de arrollamientos partiremos siempre del valor del número q de ranuras por polo y fase.

Si $q = N/2pm$ es un número fraccionario múltiplo de 0,5 (o sea: $q = 1{,}5$; 2,5; 3,5; etc.), tomaremos primero $q - 0{,}5$ lados de bobinas de la fase *A* y los dibujaremos sobre las primeras ranuras. Estos lados de bobinas ocuparán por entero su respectiva ranura.

A continuación, situaremos un lado de bobina de la fase *A* en la siguiente ranura. Este lado solamente ocupará la mitad de la ranura, pues pertenecerá a una bobina con la mitad de espiras que las anteriormente citadas.

Seguidamente situaremos sobre la ranura incompleta un lado de bobina de la fase *C*, naturalmente también con la mitad de espiras, de modo que complete así la ranura al compartirla con un lado de bobina mitad de la fase *A*.

Después irán $q - 0{,}5$ lados de bobinas completas de la fase *C*, sobre las siguientes ranuras, ocupándolas por entero.

A continuación se dispondrán $q - 0{,}5$ lados de bobinas de la fase *B*, y se seguirá el proceso de análoga forma a como se ha iniciado con la fase *A*, continuando así hasta completar todas las ranuras de la máquina.

Si $q = N/2pm$ es un número entero, cabe también construir un arrollamiento mixto, siempre que de ello se obtengan ventajas.

Entonces q se subdividirá en fracciones múltiplos de 0,5 (por ejemplo: $q = 3 = 0{,}5 + 1 + 1 + 0{,}5$) distribuyéndose los lados de bobinas en las ranuras de acuerdo con la subdivisión efectuada. Por ejemplo, con $q = 3$, se dispondría en la primera ranura un lado de bobina mitad de la fase *A*, en la segunda y tercera ranura dos lados de bobinas completas de la fase *A*, y en la cuarta ranura un lado de bobina mitad de la fase *A*.

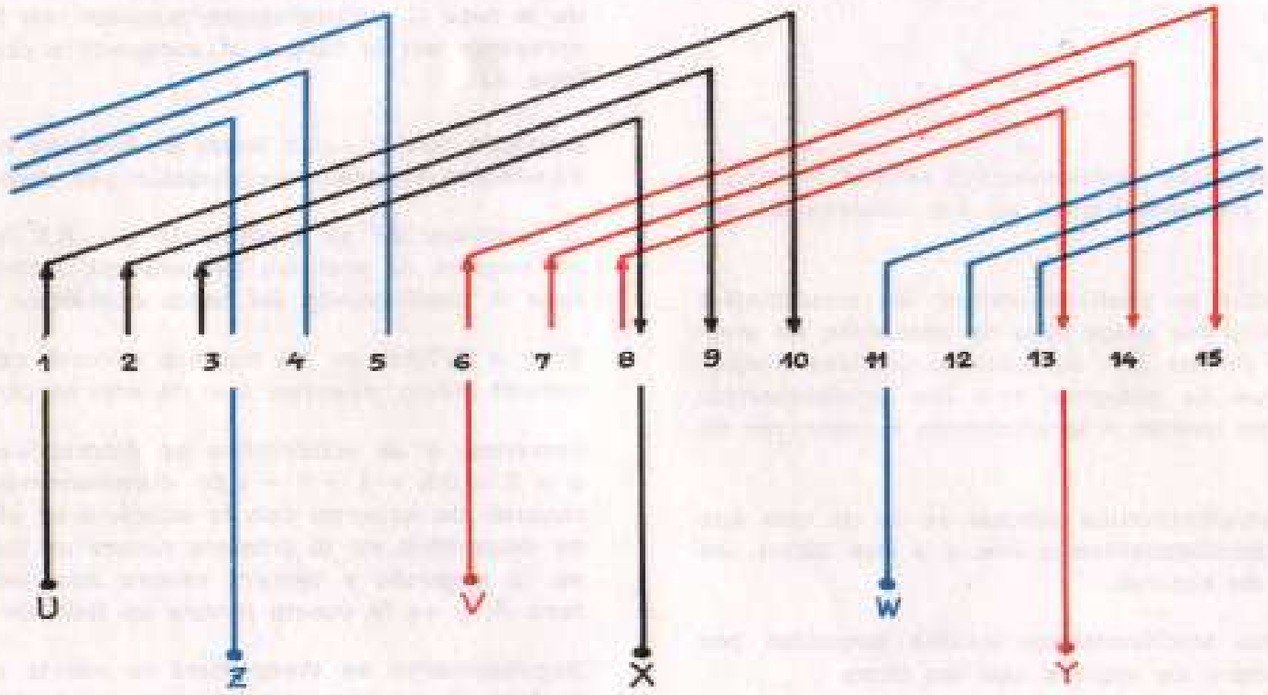
Seguidamente se completará la cuarta ranura con una bobina mitad de la fase *C*, se llenarán las dos siguientes ranuras con lados de bobinas completas de la misma fase, y se dispondrá en la ranura que sigue un lado de bobina mitad de la fase *C*.

Continuaríamos con la fase *B*, de modo análogo, y repetiríamos la operación ordenada y sucesivamente con las tres fases, hasta agotar todas las ranuras de la máquina.

En cuanto a las cabezas de bobinas y al paso del devanado, véanse las orientaciones dadas al tratar los esquemas de arrollamientos enteros (página 87).

15 ranuras , 2 polos

Arrollamiento mixto, con bobinas trapeciales

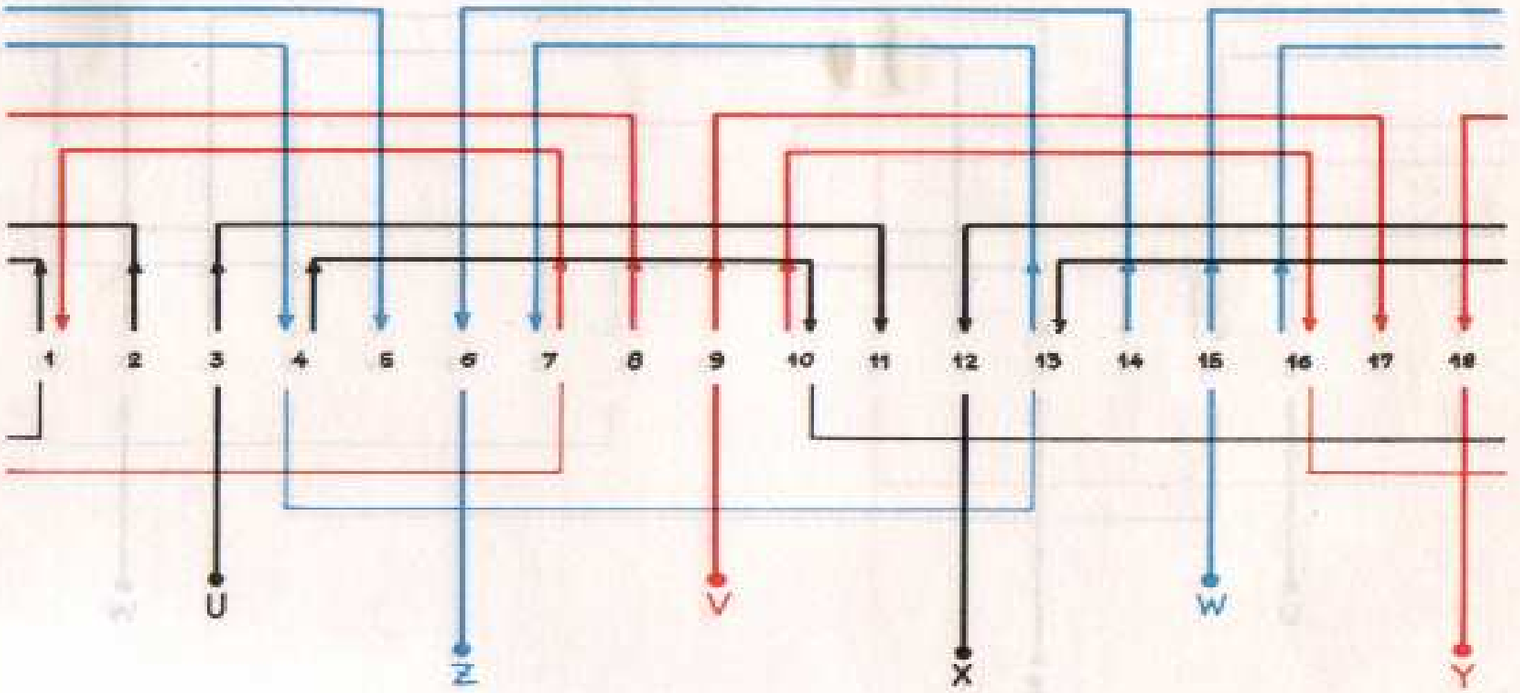


Por fase : 1 grupo de 3 bobinas , la central con la mitad de conductores

Terminales : $U = 1$; $V = 6$; $W = 11$
$X = 8$; $Y = 13$; $Z = 3$

18 ranuras , 2 polos

Arrollamiento mixto , con cabezas en tres planos



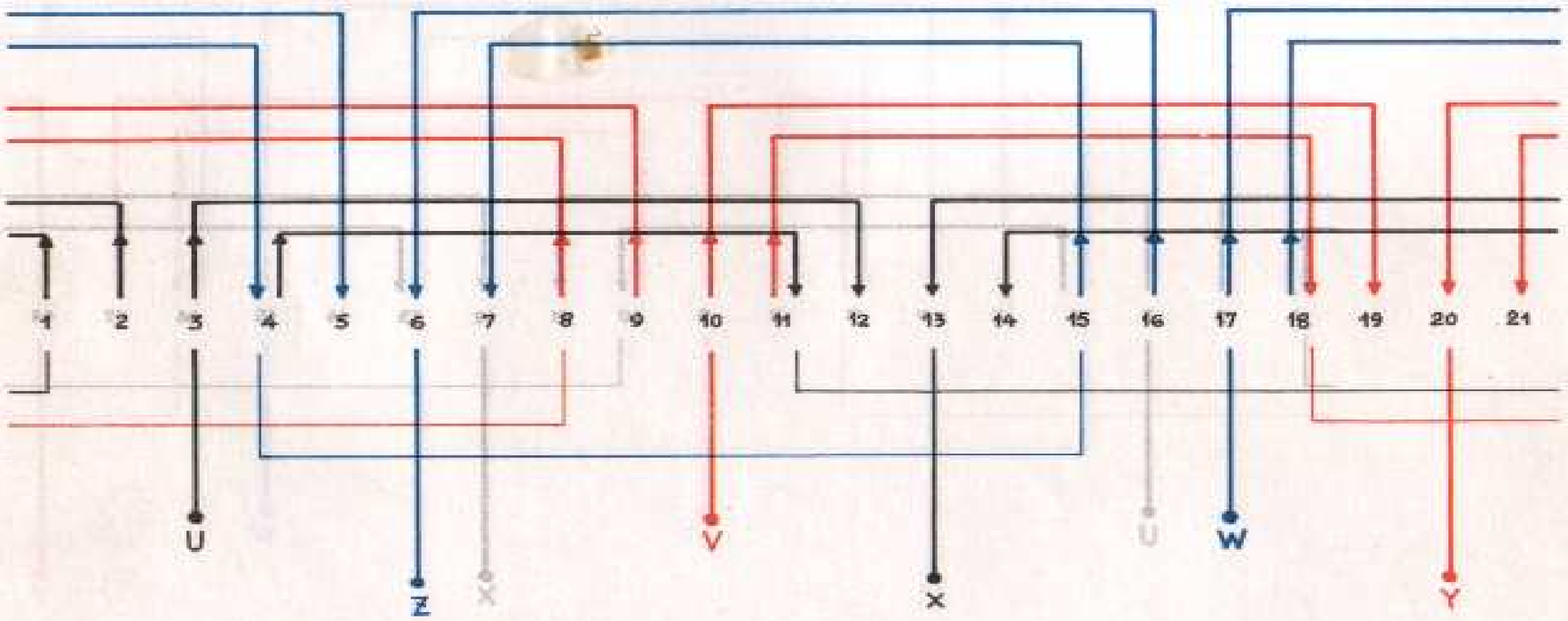
Por fase :

2 grupos de 2 bobinas , las centrales con la mitad de conductores

Terminales : $U = 3$; $V = 9$; $W = 15$
$X = 12$; $Y = 18$; $Z = 6$

21 ranuras , 2 polos

Arrollamiento mixto, con cabezas en tres planos



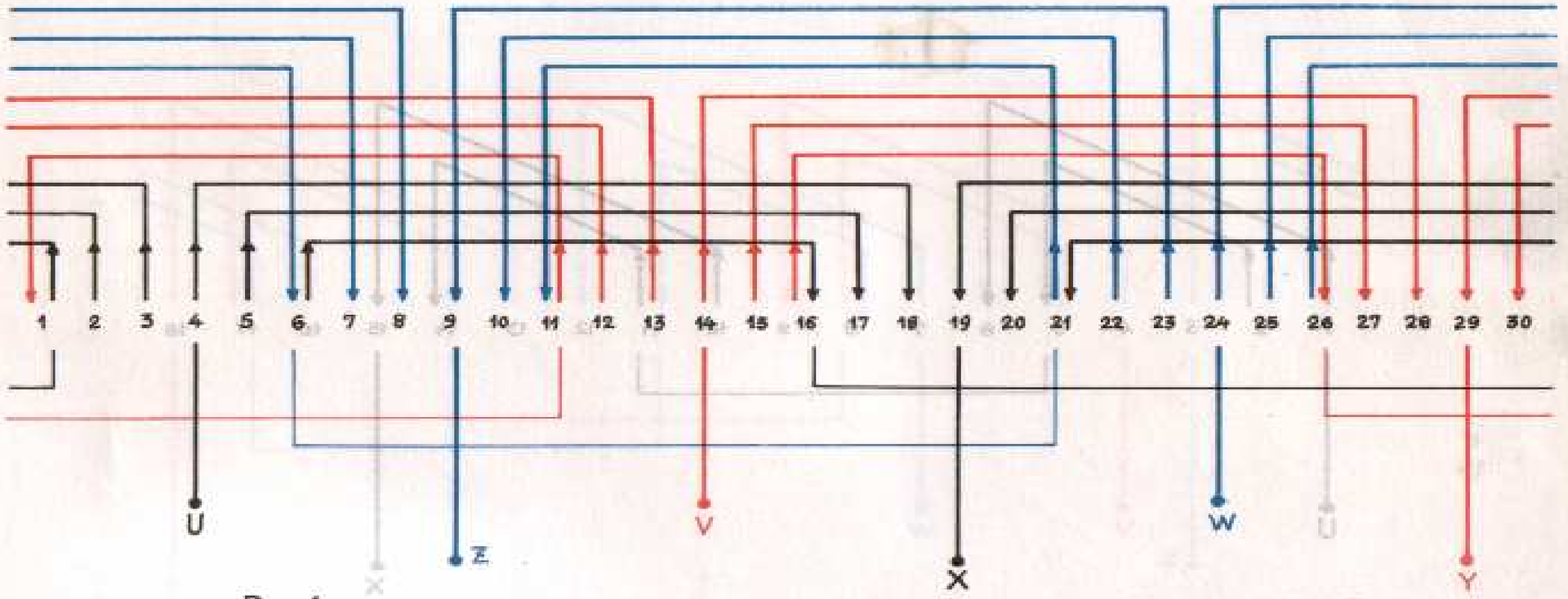
Por fase:

2 grupos de 2 bobinas. En un grupo, la bobina central con la mitad de conductores

Terminales: $U = 3$; $V = 10$; $W = 17$
$X = 13$; $Y = 20$; $Z = 6$

30 ranuras , 2 polos

Arrollamiento mixto , con cabezas en tres planos



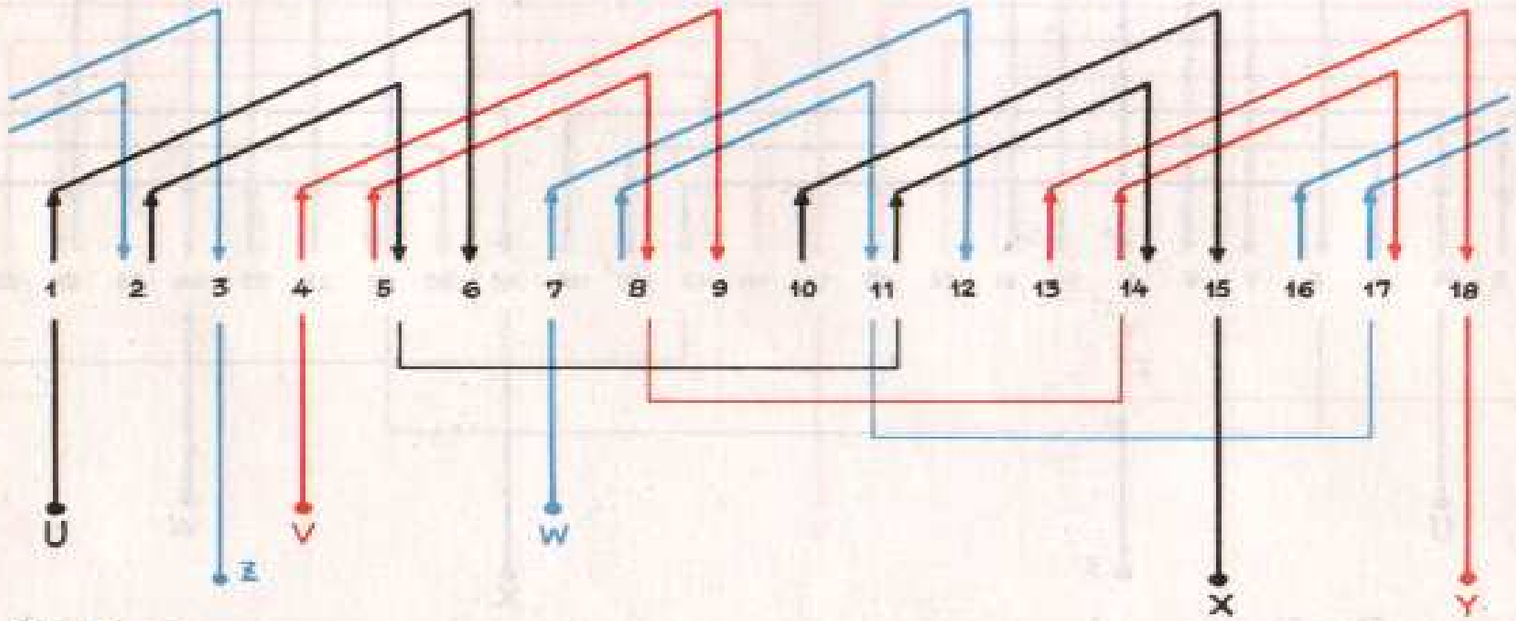
Por fase:

2 grupos de 3 bobinas ; la menor de cada grupo, con la mitad de conductores

Terminales : $U = 4$; $V = 14$; $W = 24$
$X = 19$; $Y = 29$; $Z = 9$

18 ranuras , 4 polos

Arrollamiento mixto , con bobinas trapeciales



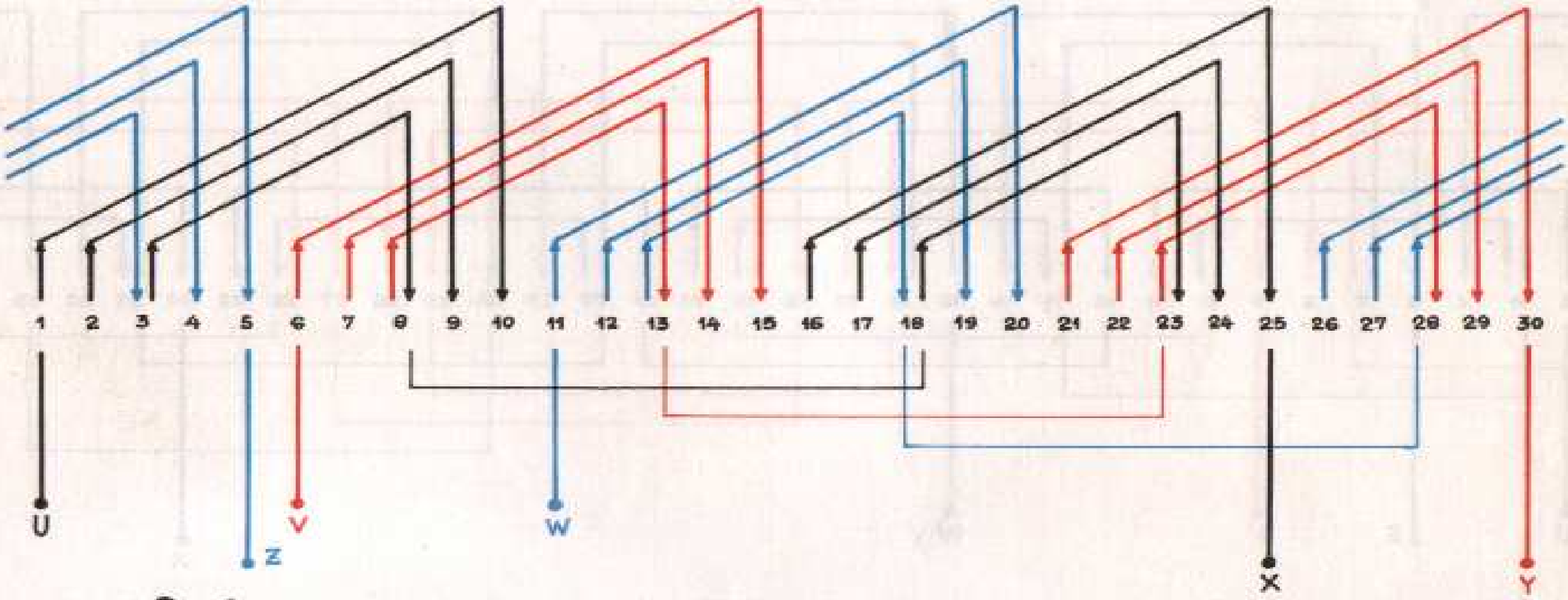
Por fase :

2 grupos de 2 bobinas ; la menor de cada grupo, con la mitad de conductores

Terminales : $U = 1$; $V = 4$; $W = 7$
$X = 15$; $Y = 18$; $Z = 3$

30 ranuras , 4 polos

Arrollamiento mixto , con bobinas trapeciales



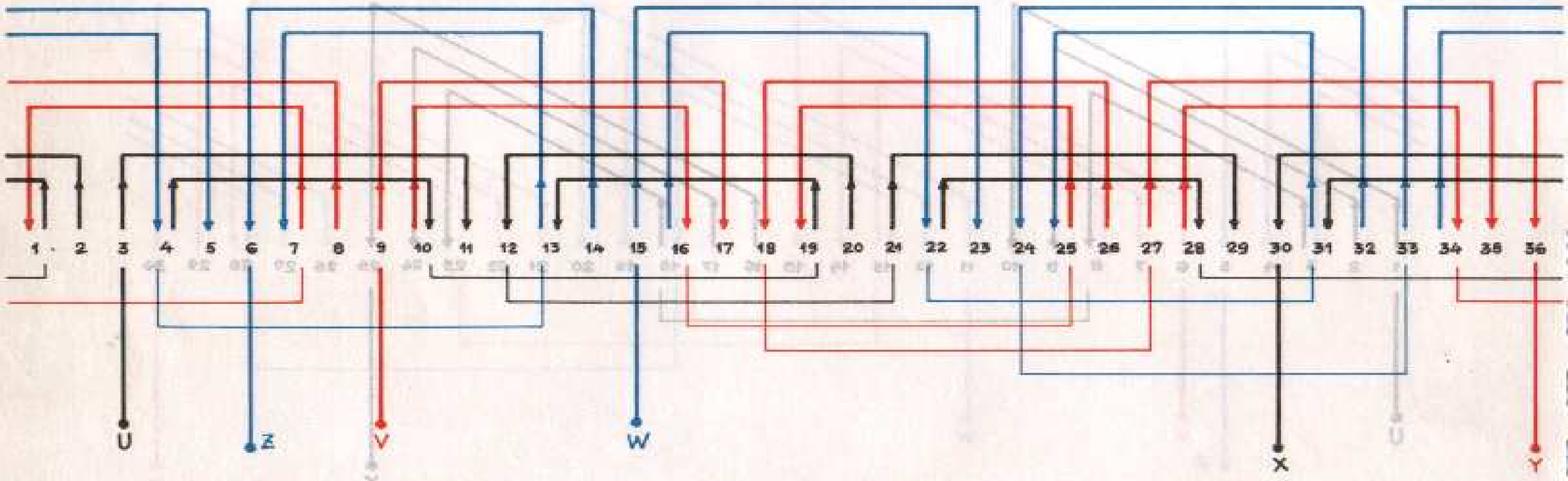
Por fase :

2 grupos de 3 bobinas ; la menor de cada grupo, con la mitad de conductores

Terminales : $U = 1$; $V = 6$; $W = 11$
$X = 25$; $Y = 30$; $Z = 5$

36 ranuras , 4 polos

Arrollamiento mixto , con cabezas en tres planos



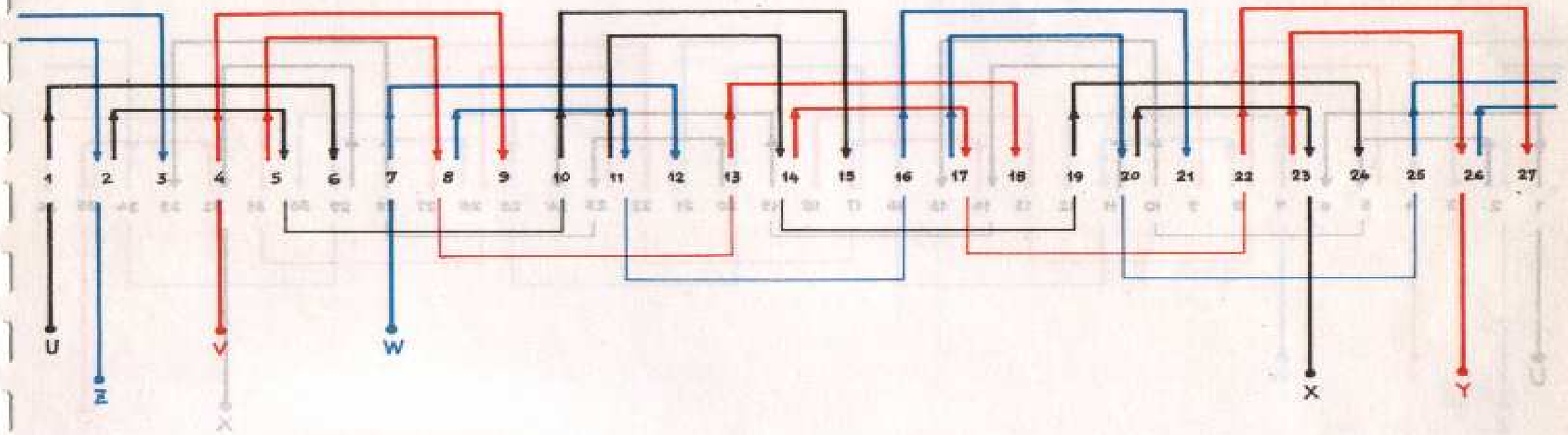
Por fase :

4 grupos de 2 bobinas ; la menor de cada grupo, con la mitad de conductores

Terminales : $U = 3$; $V = 9$; $W = 15$
$X = 30$; $Y = 36$; $Z = 6$

27 ranuras, 6 polos

Arrollamiento mixto, con cabezas en dos planos



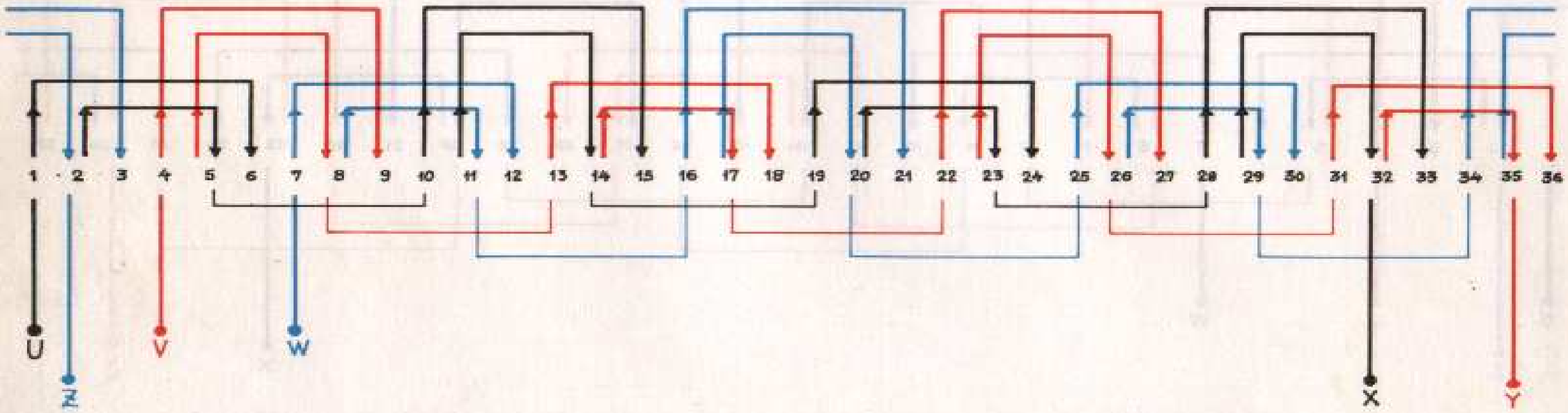
Por fase :

3 grupos de 2 bobinas ; la menor de cada grupo , con la mitad de conductores

Terminales : $U = 1$; $V = 4$; $W = 7$
$X = 23$; $Y = 26$; $Z = 2$

36 ranuras, 8 polos

Arrollamiento mixto , con cabezas en dos planos



Por fase:

4 grupos de 2 bobinas ; la menor de cada grupo , con la mitad de conductores

Terminales : $U = 1$; $V = 4$; $W = 7$
$X = 32$; $Y = 35$; $Z = 2$

IV. ARROLLAMIENTOS TRIFASICOS PARA DOS VELOCIDADES

A continuación se exponen varios planes de arrollamientos trifásicos a dos capas, correspondientes a motores de dos velocidades, para números de polos que están en la relación 2/1.

Aunque en el capítulo XII se expuso detenidamente el método para dibujar el plan del arrollamiento de un motor de polos conmutables, resumiremos aquí el procedimiento a seguir:

Construida la estrella de ranuras para el menor número de polos, y repartidos los rayos sobre las ranuras, se dibuja como siempre el plan del arrollamiento a dos capas, pero sin verificar las conexiones entre grupos de bobinas.

Hecho esto, se subdivide el número total de grupos de cada fase en dos mitades idénticas (siendo imprescindible que dichas mitades sean totalmente iguales), partes que se unen entre sí (en serie, o en paralelo si ello es posible y así se deseas) dejando en la unión entre ambas partes una salida *M* al exterior.

Además de este terminal *M*, en cada fase se tienen dos terminales, *P* y *F*, correspondientes a los principios (*U*, *V* y *W*) y a los finales (*X*, *Y* y *Z*) de dichas fases. En total hay, pues, nueve salidas al exterior.

De acuerdo con la conexión efectuada entre estos nueve terminales, se obtienen las dos posibles conexiones Dahlander:

- Triángulo - estrella doble paralelo, y
- Estrella - estrella doble paralelo.

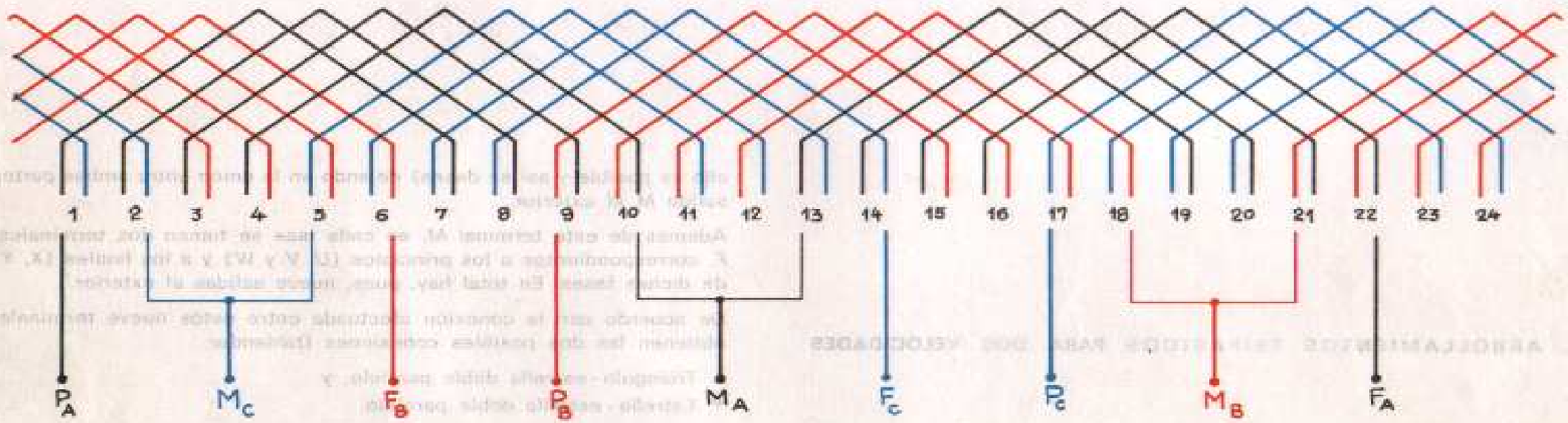
Para que el motor gire siempre en el mismo sentido a las dos velocidades posibles, cuestión que puede ser imprescindible, es necesario que la conexión de los terminales a la red de tensión sea la correcta.

En las láminas que siguen, debajo de cada plan de arrollamiento se han escrito los nombres de los terminales y su correcta conexión a la red en los dos posibles casos de conexión antedichos.

El rotor de los motores de dos velocidades suele ser en jaula de ardilla y, entonces, la relación de ranuras estator/rotor debe ser conveniente para los dos números de polos del motor.

Si el rotor es de anillos rozantes, entonces su arrollamiento debe ser también de polos conmutables, de modo que en la maniobra de conmutación siempre correspondan al estator y al rotor igual número de polos. Si se desean obtener más de dos velocidades, en general se sitúan dos arrollamientos de polos conmutables sobre el mismo estator. La relación de ranuras estator/rotor tendrá entonces que ser favorable para los cuatro números de polos del motor.

24 ranuras, 4/2 polos



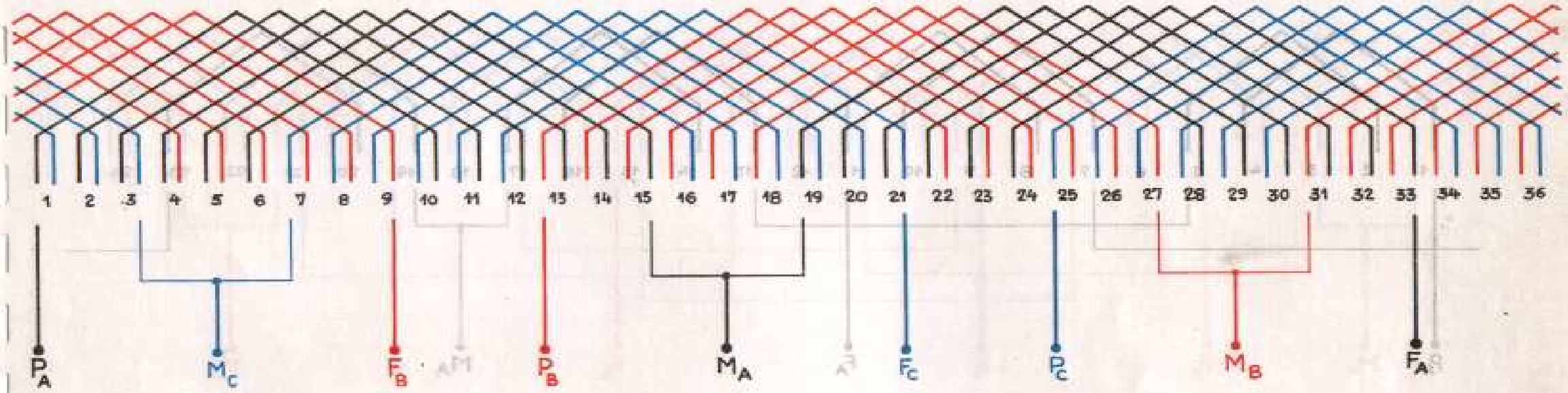
CONEXIÓN DAHLANDER Δ/人人

- **Δ (2p=4)**
  - $F_A \to P_B = V_4$; $F_B \to P_C = W_4$; $F_C \to P_A = U_4$
  - $U_4 \to R$; $V_4 \to S$; $W_4 \to T$
  - $M_A = W_2$, $M_B = V_2$, $M_C = U_2$ abiertos
- **人人 (2p=2)**
  - $F_A \to P_B = V_4$; $F_B \to P_C = W_4$; $F_C \to P_A = U_4$
  - $U_4 \to V_4 \to W_4$
  - $M_A = W_2 \to T$; $M_B = V_2 \to S$; $M_C = U_2 \to R$

CONEXIÓN DAHLANDER 人/人人

- **人 (2p=4)**
  - $F_A \to F_B \to F_C$
  - $P_A = U_4 \to R$; $P_B = V_4 \to S$; $P_C = W_4 \to T$
  - $M_A = W_2$, $M_B = V_2$, $M_C = U_2$ abiertos
- **人人 (2p=2)**
  - $F_A \to F_B \to F_C$
  - $P_A = U_4 \to P_B = V_4 \to P_C = W_4$
  - $M_A = W_2 \to T$; $M_B = V_2 \to S$; $M_C = U_2 \to R$

36 ranuras, 4/2 polos



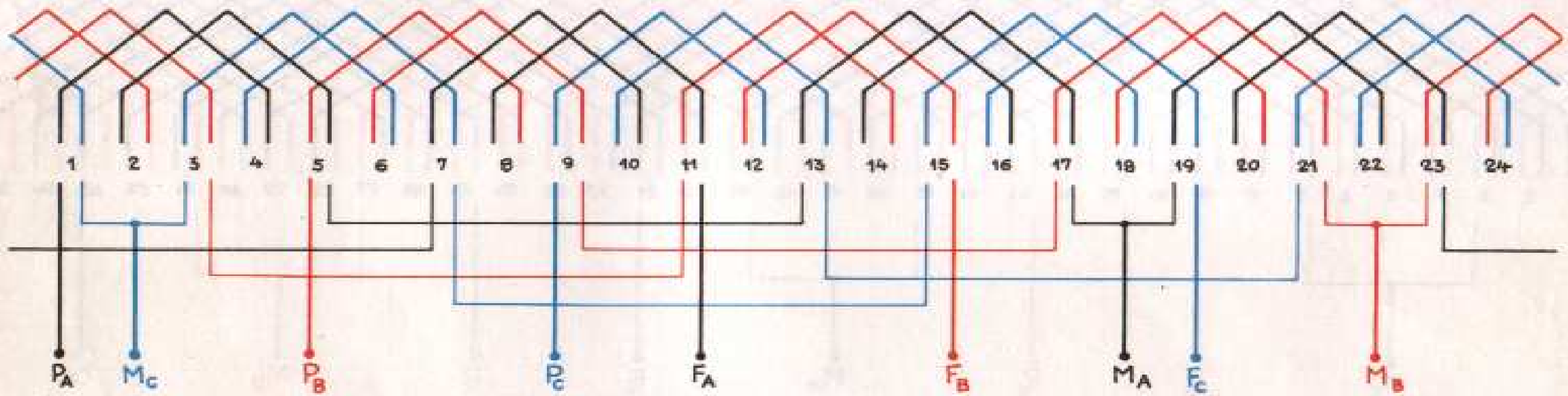
CONEXIÓN DAHLANDER Δ/人人

- **Δ (2p=4)**
  - $F_A \to P_B = V_4$; $F_B \to P_C = W_4$; $F_C \to P_A = U_4$
  - $U_4 \to R$; $V_4 \to S$; $W_4 \to T$
  - $M_A = W_2$, $M_B = V_2$, $M_C = U_2$ abiertos
- **人人 (2p=2)**
  - $F_A \to P_B = V_4$; $F_B \to P_C = W_4$; $F_C \to P_A = U_4$
  - $U_4 \to V_4 \to W_4$
  - $M_A = W_2 \to T$; $M_B = V_2 \to S$; $M_C = U_2 \to R$

CONEXIÓN DAHLANDER 人/人人

- **人 (2p=4)**
  - $F_A \to F_B \to F_C$
  - $P_A = U_4 \to R$; $P_B = V_4 \to S$; $P_C = W_4 \to T$
  - $M_A = W_2$, $M_B = V_2$, $M_C = U_2$ abiertos
- **人人 (2p=2)**
  - $F_A \to F_B \to F_C$
  - $P_A = U_4 \to P_B = V_4 \to P_C = W_4$
  - $M_A = W_2 \to T$; $M_B = V_2 \to S$; $M_C = U_2 \to R$

24 ranuras , 8/4 polos



CONEXIÓN DAHLANDER Δ/ΔΔ

Δ (2p=8)

$F_A \to P_B = V_8$; $F_B \to P_C = W_8$; $F_C \to P_A = U_8$

$U_8 \to R$; $V_8 \to S$; $W_8 \to T$

$M_A = W_4$, $M_B = V_4$, $M_C = U_4$ abiertos

ΔΔ (2p=4)

$F_A \to P_B = V_8$; $F_B \to P_C = W_8$; $F_C \to P_A = U_8$

$U_8 \to V_8 \to W_8$

$M_A = W_4 \to T$; $M_B = V_4 \to S$; $M_C = U_4 \to R$

CONEXIÓN DAHLANDER Δ/ΔΔ

Δ (2p=8)

$F_A \to F_B \to F_C$

$P_A = U_8 \to R$; $P_B = V_8 \to S$; $P_C = W_8 \to T$

$M_A = W_8$, $M_B = V_8$, $M_C = U_8$ abiertos

ΔΔ (2p=4)

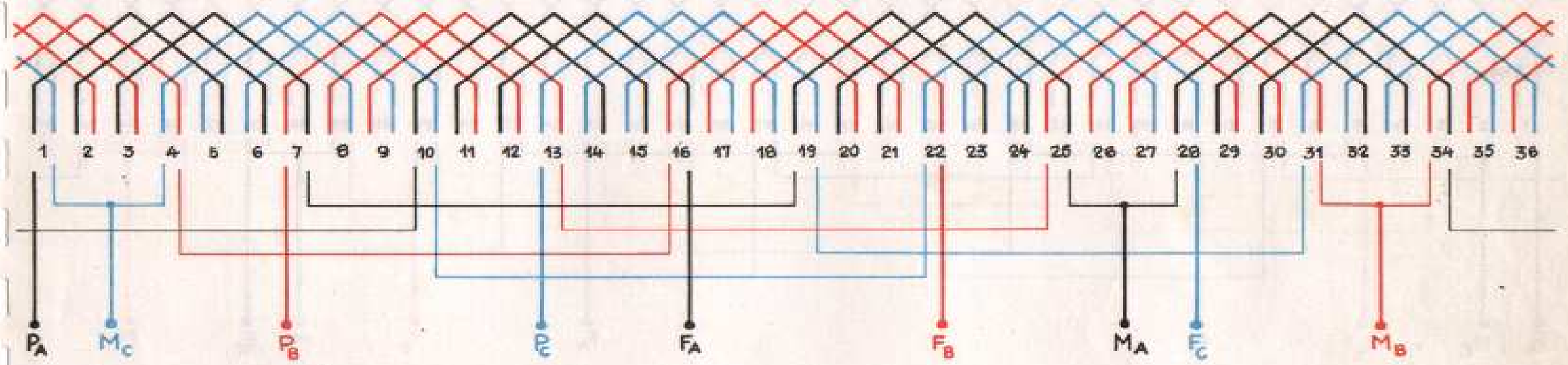
$F_A \to F_B \to F_C$

$P_A = U_8 \to P_B = V_8 \to P_C = W_8$

$M_A = W_4 \to T$; $M_B = V_4 \to S$; $M_C = U_4 \to R$

„Sofo-Handbuch"

36 ranuras, 8/4 polos



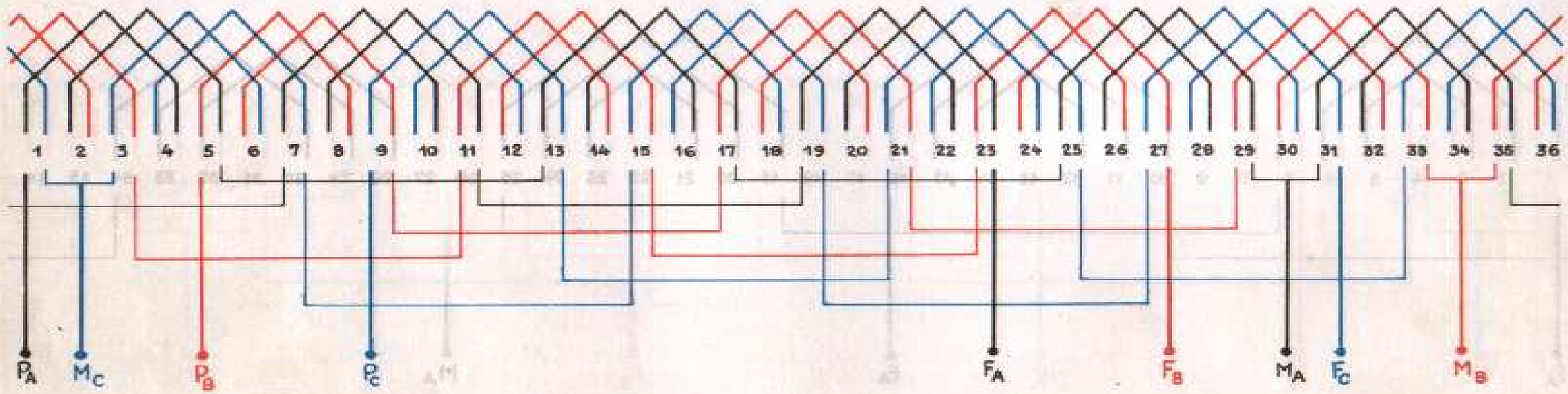
CONEXIÓN DAHLANDER Δ / ⅄⅄

- Δ (2p=8)
  - $F_A \to P_B = V_8$; $F_B \to P_C = W_8$; $F_C \to P_A = U_8$
  - $U_8 \to R$; $V_8 \to S$; $W_8 \to T$
  - $M_A = W_4$, $M_B = V_4$, $M_C = U_4$ abiertos
- ⅄⅄ (2p=4)
  - $F_A \to P_B = V_8$; $F_B \to P_C = W_8$; $F_C \to P_A = U_8$
  - $U_8 \to V_8 \to W_8$
  - $M_A = W_4 \to T$; $M_B = V_4 \to S$; $M_C = U_4 \to R$

CONEXIÓN DAHLANDER ⅄ / ⅄⅄

- ⅄ (2p=8)
  - $F_A \to F_B \to F_C$
  - $P_A = U_8 \to R$; $P_B = V_8 \to S$; $P_C = W_8 \to T$
  - $M_A = W_8$, $M_B = V_8$, $M_C = U_8$ abiertos
- ⅄⅄ (2p=4)
  - $F_A \to F_B \to F_C$
  - $P_A = U_8 \to P_B = V_8 \to P_C = W_8$
  - $M_A = W_4 \to T$; $M_B = V_4 \to S$; $M_C = U_4 \to R$

36 ranuras, 12/6 polos



CONEXIÓN DAHLANDER Δ/人人

- **Δ (2p=12)**
  - $F_A \to P_B = V_{12}$; $F_B \to P_C = W_{12}$; $F_C \to P_A = U_{12}$
  - $U_{12} \to R$; $V_{12} \to S$; $W_{12} \to T$
  - $M_A = W_6$, $M_B = V_6$, $M_C = U_6$ abiertos
- **人人 (2p=6)**
  - $F_A \to P_B = V_{12}$; $F_B \to P_C = W_{12}$; $F_C \to P_A = U_{12}$
  - $U_{12} \to V_{12} \to W_{12}$
  - $M_A = W_6 \to T$; $M_B = V_6 \to S$; $M_C = U_6 \to R$

CONEXIÓN DAHLANDER 人/人人

- **人 (2p=12)**
  - $F_A \to F_B \to F_C$
  - $P_A = U_{12} \to R$; $P_B = V_{12} \to S$; $P_C = W_{12} \to T$
  - $M_A = W_6$, $M_B = V_6$, $M_C = U_6$ abiertos
- **人人 (2p=6)**
  - $F_A \to F_B \to F_C$
  - $P_A = U_{12} \to P_B = V_{12} \to P_C = W_{12}$
  - $M_A = W_6 \to T$; $M_B = V_6 \to S$; $M_C = U_6 \to R$

V. TABLAS Y ESQUEMAS DE CONEXIONES

Sobre las tablas de conexiones y su empleo práctico ya se han dado instrucciones en el capítulo XI (pág. 76). Insistiremos aquí en que para escoger la tabla se atenderá solamente al número de polos del arrollamiento y a si éste es de polos consecuentes o de polos alternados. Se prescindirá, pues, del valor del número de ranuras *N* de la máquina. Las tablas son válidas cualquiera que sea el valor del número *N* de ranuras.

Escogida correctamente la tabla, se puede leer en ella las posibles conexiones a efectuar, para cada fase, y cómo se han de realizar dichas conexiones. Con una flechita se indica los terminales a unir. Un punto entre dos terminales (entendiendo siempre por terminales también los principios y finales de grupos), significa que éstos ya se encuentran unidos entre sí, porque así lo exige el arrollamiento. Las dos rayitas verticales paralelas ya sabemos que indican que la conexión a efectuar es en paralelo.

El que una tabla indique la posibilidad de efectuar cierto número de conexiones en paralelo no significa que necesariamente se puedan realizar éstas en todos los casos. El que dichas conexiones sean o no eléctricamente posibles hay que analizarlo de acuerdo con las instrucciones del capítulo XI. Si de este estudio se desprende que se pueden realizar conexiones en paralelo (y el número de ramas), entonces las tablas indican cómo se deben verificar las conexiones.

Debajo de cada tabla se expresan también las conexiones de los terminales a la red, para obtener las conexiones de estrella o de triángulo.

En cuanto a los esquemas de conexión reflejan gráficamente las conexiones que hay que realizar entre los grupos de las distintas fases, tal como se deberán llevar a cabo sobre la máquina. En el centro de dichos esquemas se da también una representación visual de la conexión de los grupos (en estrella o triángulo), expresando cada grupo con un circulito numerado.

La ordenación de los grupos sucesivos en los esquemas se ha hecho en el sentido de las agujas del reloj. Naturalmente esto no representa ninguna dificultad para el bobinador aunque éste recorra el arrollamiento en sentido opuesto.

Tanto en los esquemas correspondientes a polos consecuentes como en los de polos alternados, la fase *A* se ha representado de trazo grueso, la fase *B* de trazo discontinuo, y la fase *C* de trazo fino.

Como ya sabemos por el capítulo XI, en los arrollamientos de polos consecuentes la fase *A* se compone de los grupos: 1, 4, 7, 10, 13, etc.; la fase *B*, de los grupos: 2, 5, 8, 11, 14, etc.; la fase *C*, de los grupos: 3, 6, 9, 12, 15, etc.

En cambio, en los arrollamientos de polos alternados la fase *A* está constituida por los grupos: 1, 4, 7, 10, 13, etc.; la fase *B*, por los grupos: 3, 6, 9, 12, 15, etc.; y la fase *C*, por los grupos: 5, 8, 11, 14, ... y 2. Nótese que en esta fase *C*, el primer grupo de bobinas es siempre el 5, siendo el 2 el último de esta fase.

En los esquemas, de cada fase se han sacado siempre los terminales *U*, *V* y *W*. Cuando se trata de conexión en estrella, los terminales *X*, *Y* y *Z* se han unido mediante un círculo o arcos de punto y raya, sin sacarlos normalmente al exterior.

En algunos casos que admiten combinaciones de conexiones simples y de conexiones en paralelo, o de diferentes conexiones en paralelo, se han sacado más de tres terminales al exterior, expresando entonces al pie de estos esquemas las uniones que en cada caso hay que realizar. También aquí es necesario determinar mediante el método estudiado en el capítulo XI si eléctricamente es posible o no realizar dichas conexiones en paralelo.

Siguiendo cuidadosamente los esquemas de conexión que se exponen, es posible realizar todas las conexiones que se pueden presentar en arrollamientos desde 2 a 12 polos, cualquiera que sea el número *N* de ranuras de la máquina.

TABLA DE CONEXIONES PARA A. DE POLOS CONSECUENTES 2p = 4			
Fases	Conexiones		Terminales
A	en serie	$P_1F_1 \rightarrow P_4F_4$	$U \rightarrow P_1$, $X \rightarrow F_4$
	2 grupos en II	$P_1F_1 \text{ II } P_4F_4$	$U \rightarrow P_1 \cdot P_4$, $X \rightarrow F_1 \cdot F_4$
B	en serie	$P_2F_2 \rightarrow P_5F_5$	$V \rightarrow P_2$, $Y \rightarrow F_5$
	2 grupos en II	$P_2F_2 \text{ II } P_5F_5$	$V \rightarrow P_2 \cdot P_5$, $Y \rightarrow F_2 \cdot F_5$
C	en serie	$P_3F_3 \rightarrow P_6F_6$	$W \rightarrow P_3$, $Z \rightarrow F_6$
	2 grupos en II	$P_3F_3 \text{ II } P_6F_6$	$W \rightarrow P_3 \cdot P_6$, $Z \rightarrow F_3 \cdot F_6$

Conexión en estrella : $U \rightarrow R$, $V \rightarrow S$, $W \rightarrow T$

$X \rightarrow Y \rightarrow Z$ (punto neutro)

Conexión en triángulo : $U \rightarrow Z \rightarrow R$

$V \rightarrow X \rightarrow S$

$W \rightarrow Y \rightarrow T$

R, S y T son las tres fases de la línea de alimentación

TABLA DE CONEXIONES PARA A. DE POLOS CONSECUENTES 2p = 6			
Fases	Conexiones		Terminales
A	en serie	$P_1F_1 \rightarrow P_4F_4 \rightarrow P_7F_7$	$U \rightarrow P_1$, $X \rightarrow F_7$
	3 grupos en II	$P_1F_1 \text{ II } P_4F_4 \text{ II } P_7F_7$	$U \rightarrow P_1 \cdot P_4 \cdot P_7$ $X \rightarrow F_1 \cdot F_4 \cdot F_7$
B	en serie	$P_2F_2 \rightarrow P_5F_5 \rightarrow P_8F_8$	$V \rightarrow P_2$, $Y \rightarrow F_8$
	3 grupos en II	$P_2F_2 \text{ II } P_5F_5 \text{ II } P_8F_8$	$V \rightarrow P_2 \cdot P_5 \cdot P_8$ $Y \rightarrow F_2 \cdot F_5 \cdot F_8$
C	en serie	$P_3F_3 \rightarrow P_6F_6 \rightarrow P_9F_9$	$W \rightarrow P_3$, $Z \rightarrow F_9$
	3 grupos en II	$P_3F_3 \text{ II } P_6F_6 \text{ II } P_9F_9$	$W \rightarrow P_3 \cdot P_6 \cdot P_9$ $Z \rightarrow F_3 \cdot F_6 \cdot F_9$

Conexión en estrella : $U \rightarrow R$, $V \rightarrow S$, $W \rightarrow T$
$X \rightarrow Y \rightarrow Z$ (punto neutro)

Conexión en triángulo : $U \rightarrow Z \rightarrow R$
$V \rightarrow X \rightarrow S$
$W \rightarrow Y \rightarrow T$

R, S y T son las tres fases de la línea de alimentación

TABLA DE CONEXIONES PARA A. DE POLOS CONSECUENTES, 2p = 8

Fases	Conexiones		Terminales
A	en serie	$P_1F_1 \rightarrow P_4F_4 \rightarrow P_7F_7 \rightarrow P_{10}F_{10}$	$U \rightarrow P_1$, $X \rightarrow F_{10}$
	2 grupos en ll	$P_1F_1 \rightarrow P_4F_4 \;\|\|\; P_7F_7 \rightarrow P_{10}F_{10}$	$U \rightarrow P_1 \cdot P_7$, $X \rightarrow F_4 \cdot F_{10}$
	4 grupos en ll	$P_1F_1 \;\|\|\; P_4F_4 \;\|\|\; P_7F_7 \;\|\|\; P_{10}F_{10}$	$U \rightarrow P_1 \cdot P_4 \cdot P_7 \cdot P_{10}$, $X \rightarrow F_1 \cdot F_4 \cdot F_7 \cdot F_{10}$
B	en serie	$P_2F_2 \rightarrow P_5F_5 \rightarrow P_8F_8 \rightarrow P_{11}F_{11}$	$V \rightarrow P_2$, $Y \rightarrow F_{11}$
	2 grupos en ll	$P_2F_2 \rightarrow P_5F_5 \;\|\|\; P_8F_8 \rightarrow P_{11}F_{11}$	$V \rightarrow P_2 \cdot P_8$, $Y \rightarrow F_5 \cdot F_{11}$
	4 grupos en ll	$P_2F_2 \;\|\|\; P_5F_5 \;\|\|\; P_8F_8 \;\|\|\; P_{11}F_{11}$	$V \rightarrow P_2 \cdot P_5 \cdot P_8 \cdot P_{11}$, $Y \rightarrow F_2 \cdot F_5 \cdot F_8 \cdot F_{11}$
C	en serie	$P_3F_3 \rightarrow P_6F_6 \rightarrow P_9F_9 \rightarrow P_{12}F_{12}$	$W \rightarrow P_3$, $Z \rightarrow F_{12}$
	2 grupos en ll	$P_3F_3 \rightarrow P_6F_6 \;\|\|\; P_9F_9 \rightarrow P_{12}F_{12}$	$W \rightarrow P_3 \cdot P_9$, $Z \rightarrow F_6 \cdot F_{12}$
	4 grupos en ll	$P_3F_3 \;\|\|\; P_6F_6 \;\|\|\; P_9F_9 \;\|\|\; P_{12}F_{12}$	$W \rightarrow P_3 \cdot P_6 \cdot P_9 \cdot P_{12}$, $Z \rightarrow F_3 \cdot F_6 \cdot F_9 \cdot F_{12}$

Conexión en estrella : $U \rightarrow R$, $V \rightarrow S$, $W \rightarrow T$
$X \rightarrow Y \rightarrow Z$ (punto neutro)

Conexión en triángulo : $U \rightarrow Z \rightarrow R$, $V \rightarrow X \rightarrow S$, $W \rightarrow Y \rightarrow T$

R, S y T son las tres fases de la línea de alimentación

TABLA DE CONEXIONES PARA A. DE POLOS CONSECUENTES, $2p = 10$

Fases	Conexiones		Terminales
A	en serie	$P_1F_1 \rightarrow P_4F_4 \rightarrow P_7F_7 \rightarrow P_{10}F_{10} \rightarrow P_{13}F_{13}$	$U \rightarrow P_1$, $X \rightarrow F_{13}$
	5 grupos en II	$P_1F_1 \text{ II } P_4F_4 \text{ II } P_7F_7 \text{ II } P_{10}F_{10} \text{ II } P_{13}F_{13}$	$U \rightarrow P_1 \cdot P_4 \cdot P_7 \cdot P_{10} \cdot P_{13}$, $X \rightarrow F_1 \cdot F_4 \cdot F_7 \cdot F_{10} \cdot F_{13}$
B	en serie	$P_2F_2 \rightarrow P_5F_5 \rightarrow P_8F_8 \rightarrow P_{11}F_{11} \rightarrow P_{14}F_{14}$	$V \rightarrow P_2$, $Y \rightarrow F_{14}$
	5 grupos en II	$P_2F_2 \text{ II } P_5F_5 \text{ II } P_8F_8 \text{ II } P_{11}F_{11} \text{ II } P_{14}F_{14}$	$V \rightarrow P_2 \cdot P_5 \cdot P_8 \cdot P_{11} \cdot P_{14}$, $Y \rightarrow F_2 \cdot F_5 \cdot F_8 \cdot F_{11} \cdot F_{14}$
C	en serie	$P_3F_3 \rightarrow P_6F_6 \rightarrow P_9F_9 \rightarrow P_{12}F_{12} \rightarrow P_{15}F_{15}$	$W \rightarrow P_3$, $Z \rightarrow F_{15}$
	5 grupos en II	$P_3F_3 \text{ II } P_6F_6 \text{ II } P_9F_9 \text{ II } P_{12}F_{12} \text{ II } P_{15}F_{15}$	$W \rightarrow P_3 \cdot P_6 \cdot P_9 \cdot P_{12} \cdot P_{15}$, $Z \rightarrow F_3 \cdot F_6 \cdot F_9 \cdot F_{12} \cdot F_{15}$

Conexión en estrella: $U \rightarrow R$, $V \rightarrow S$, $W \rightarrow T$

$X \rightarrow Y \rightarrow Z$ (punto neutro)

Conexión en triángulo: $U \rightarrow Z \rightarrow R$

$V \rightarrow X \rightarrow S$

$W \rightarrow Y \rightarrow T$

R, S y T son las tres fases de la línea de alimentación

TABLA DE CONEXIONES PARA A. DE POLOS CONSECUENTES 2p = 12

Fases	Conexiones		Terminales	
A	en serie	$P_1F_1 \rightarrow P_4F_4 \rightarrow P_7F_7 \rightarrow P_{10}F_{10} \rightarrow P_{13}F_{13} \rightarrow P_{16}F_{16}$	$U \rightarrow P_1$	$X \rightarrow F_{16}$
	2 grupos en ∥	$P_1F_1 \rightarrow P_4F_4 \rightarrow P_7F_7 \parallel P_{10}F_{10} \rightarrow P_{13}F_{13} \rightarrow P_{16}F_{16}$	$U \rightarrow P_1 \cdot P_{10}$	$X \rightarrow F_7 \cdot F_{16}$
	3 grupos en ∥	$P_1F_1 \rightarrow P_4F_4 \parallel P_7F_7 \rightarrow P_{10}F_{10} \parallel P_{13}F_{13} \rightarrow P_{16}F_{16}$	$U \rightarrow P_1 \cdot P_7 \cdot P_{13}$	$X \rightarrow F_4 \cdot F_{10} \cdot F_{16}$
	6 grupos en ∥	$P_1F_1 \parallel P_4F_4 \parallel P_7F_7 \parallel P_{10}F_{10} \parallel P_{13}F_{13} \parallel P_{16}F_{16}$	$U \rightarrow P_1 \cdot P_4 \cdot P_7 \cdot P_{10} \cdot P_{13} \cdot P_{16}$	$X \rightarrow F_1 \cdot F_4 \cdot F_7 \cdot F_{10} \cdot F_{13} \cdot F_{16}$
B	en serie	$P_2F_2 \rightarrow P_5F_5 \rightarrow P_8F_8 \rightarrow P_{11}F_{11} \rightarrow P_{14}F_{14} \rightarrow P_{17}F_{17}$	$V \rightarrow P_2$	$Y \rightarrow F_{17}$
	2 grupos en ∥	$P_2F_2 \rightarrow P_5F_5 \rightarrow P_8F_8 \parallel P_{11}F_{11} \rightarrow P_{14}F_{14} \rightarrow P_{17}F_{17}$	$V \rightarrow P_2 \cdot P_{11}$	$Y \rightarrow F_8 \cdot F_{17}$
	3 grupos en ∥	$P_2F_2 \rightarrow P_5F_5 \parallel P_8F_8 \rightarrow P_{11}F_{11} \parallel P_{14}F_{14} \rightarrow P_{17}F_{17}$	$V \rightarrow P_2 \cdot P_8 \cdot P_{14}$	$Y \rightarrow F_5 \cdot F_{11} \cdot F_{17}$
	6 grupos en ∥	$P_2F_2 \parallel P_5F_5 \parallel P_8F_8 \parallel P_{11}F_{11} \parallel P_{14}F_{14} \parallel P_{17}F_{17}$	$V \rightarrow P_2 \cdot P_5 \cdot P_8 \cdot P_{11} \cdot P_{14} \cdot P_{17}$	$Y \rightarrow F_2 \cdot F_5 \cdot F_8 \cdot F_{11} \cdot F_{14} \cdot F_{17}$
C	en serie	$P_3F_3 \rightarrow P_6F_6 \rightarrow P_9F_9 \rightarrow P_{12}F_{12} \rightarrow P_{15}F_{15} \rightarrow P_{18}F_{18}$	$W \rightarrow P_3$	$Z \rightarrow F_{18}$
	2 grupos en ∥	$P_3F_3 \rightarrow P_6F_6 \rightarrow P_9F_9 \parallel P_{12}F_{12} \rightarrow P_{15}F_{15} \rightarrow P_{18}F_{18}$	$W \rightarrow P_3 \cdot P_{12}$	$Z \rightarrow F_9 \cdot F_{18}$
	3 grupos en ∥	$P_3F_3 \rightarrow P_6F_6 \parallel P_9F_9 \rightarrow P_{12}F_{12} \parallel P_{15}F_{15} \rightarrow P_{18}F_{18}$	$W \rightarrow P_3 \cdot P_9 \cdot P_{15}$	$Z \rightarrow F_6 \cdot F_{12} \cdot F_{18}$
	6 grupos en ∥	$P_3F_3 \parallel P_6F_6 \parallel P_9F_9 \parallel P_{12}F_{12} \parallel P_{15}F_{15} \parallel P_{18}F_{18}$	$W \rightarrow P_3 \cdot P_6 \cdot P_9 \cdot P_{12} \cdot P_{15} \cdot P_{18}$	$Z \rightarrow F_3 \cdot F_6 \cdot F_9 \cdot F_{12} \cdot F_{15} \cdot F_{18}$

Conexión en estrella : $U \rightarrow R$, $V \rightarrow S$, $W \rightarrow T$
$X \rightarrow Y \rightarrow Z$ (punto neutro)

Conexión en triángulo : $U \rightarrow Z \rightarrow R$
$V \rightarrow X \rightarrow S$
$W \rightarrow Y \rightarrow T$

R, S y T son las tres fases de la línea de alimentación

TABLA DE CONEXIONES PARA A. DE POLOS ALTERNADOS 2p = 2			
Fases	Conexiones		Terminales
A	en serie	$P_1F_1 \rightarrow F_4P_4$	$U \rightarrow P_1$, $X \rightarrow P_4$
	2 grupos en II	$P_1F_1 \,\|\|\, F_4P_4$	$U \rightarrow P_1 \cdot F_4$, $X \rightarrow F_1 \cdot P_4$
B	en serie	$P_3F_3 \rightarrow F_6P_6$	$V \rightarrow P_3$, $Y \rightarrow P_6$
	2 grupos en II	$P_3F_3 \,\|\|\, F_6P_6$	$V \rightarrow P_3 \cdot F_6$, $Y \rightarrow F_3 \cdot P_6$
C	en serie	$P_5F_5 \rightarrow F_2P_2$	$W \rightarrow P_5$, $Z \rightarrow P_2$
	2 grupos en II	$P_5F_5 \,\|\|\, F_2P_2$	$W \rightarrow P_5 \cdot F_2$, $Z \rightarrow F_5 \cdot P_2$

Conexión en estrella : $U \rightarrow R$, $V \rightarrow S$, $W \rightarrow T$

$X \rightarrow Y \rightarrow Z$ (punto neutro)

Conexión en triángulo : $U \rightarrow Z \rightarrow R$

$V \rightarrow X \rightarrow S$

$W \rightarrow Y \rightarrow T$

R, S y T son las tres fases de la línea de alimentación

TABLA DE CONEXIONES PARA A. DE POLOS ALTERNADOS 2p = 4			
Fases	Conexiones		Terminales
A	en serie	$P_1F_1 \rightarrow F_4P_4 \rightarrow P_7F_7 \rightarrow F_{10}P_{10}$	$U \rightarrow P_1$, $X \rightarrow P_{10}$
	2 en II	$P_1F_1 \rightarrow F_4P_4 \,\|\|\, P_7F_7 \rightarrow F_{10}P_{10}$	$U \rightarrow P_1 \cdot P_7$, $X \rightarrow P_4 \cdot P_{10}$
	4 en II	$P_1F_1 \,\|\|\, F_4P_4 \,\|\|\, P_7F_7 \,\|\|\, F_{10}P_{10}$	$U \rightarrow P_1 \cdot F_4 \cdot P_7 \cdot F_{10}$, $X \rightarrow F_1 \cdot P_4 \cdot F_7 \cdot P_{10}$
B	en serie	$P_3F_3 \rightarrow F_6P_6 \rightarrow P_9F_9 \rightarrow F_{12}P_{12}$	$V \rightarrow P_3$, $Y \rightarrow P_{12}$
	2 en II	$P_3F_3 \rightarrow F_6P_6 \,\|\|\, P_9F_9 \rightarrow F_{12}P_{12}$	$V \rightarrow P_3 \cdot P_9$, $Y \rightarrow P_6 \cdot P_{12}$
	4 en II	$P_3F_3 \,\|\|\, F_6P_6 \,\|\|\, P_9F_9 \,\|\|\, F_{12}P_{12}$	$V \rightarrow P_3 \cdot F_6 \cdot P_9 \cdot F_{12}$, $Y \rightarrow F_3 \cdot P_6 \cdot F_9 \cdot P_{12}$
C	en serie	$P_5F_5 \rightarrow F_8P_8 \rightarrow P_{11}F_{11} \rightarrow F_2P_2$	$W \rightarrow P_5$, $Z \rightarrow P_2$
	2 en II	$P_5F_5 \rightarrow F_8P_8 \,\|\|\, P_{11}F_{11} \rightarrow F_2P_2$	$W \rightarrow P_5 \cdot P_{11}$, $Z \rightarrow P_8 \cdot P_2$
	4 en II	$P_5F_5 \,\|\|\, F_8P_8 \,\|\|\, P_{11}F_{11} \,\|\|\, F_2P_2$	$W \rightarrow P_5 \cdot F_8 \cdot P_{11} \cdot F_2$, $Z \rightarrow F_5 \cdot P_8 \cdot F_{11} \cdot P_2$

Conexión en estrella : $U \rightarrow R$, $V \rightarrow S$, $W \rightarrow T$.
$X \rightarrow Y \rightarrow Z$ (punto neutro)

Conexión en triángulo : $U \rightarrow Z \rightarrow R$
$V \rightarrow X \rightarrow S$
$W \rightarrow Y \rightarrow T$

R, S y T son las tres fases de la línea de alimentación

TABLA DE CONEXIONES PARA A. DE POLOS ALTERNADOS $2p = 6$

Fases	Conexiones		Terminales	
A	en serie	$P_1F_1 \rightarrow F_4P_4 \rightarrow P_7F_7 \rightarrow F_{10}P_{10} \rightarrow P_{13}F_{13} \rightarrow F_{16}P_{16}$	$U \rightarrow P_1$	$X \rightarrow P_{16}$
	2 en ∥	$P_1F_1 \rightarrow F_4P_4 \rightarrow P_7F_7 \parallel F_{10}P_{10} \rightarrow P_{13}F_{13} \rightarrow F_{16}P_{16}$	$U \rightarrow P_1 \cdot F_{10}$	$X \rightarrow F_7 \cdot P_{16}$
	3 en ∥	$P_1F_1 \rightarrow F_4P_4 \parallel P_7F_7 \rightarrow F_{10}P_{10} \parallel P_{13}F_{13} \rightarrow F_{16}P_{16}$	$U \rightarrow P_1 \cdot P_7 \cdot P_{13}$	$X \rightarrow P_4 \cdot P_{10} \cdot P_{16}$
	6 en ∥	$P_1F_1 \parallel F_4P_4 \parallel P_7F_7 \parallel F_{10}P_{10} \parallel P_{13}F_{13} \parallel F_{16}P_{16}$	$U \rightarrow P_1 \cdot F_4 \cdot P_7 \cdot F_{10} \cdot P_{13} \cdot F_{16}$	$X \rightarrow F_1 \cdot P_4 \cdot F_7 \cdot P_{10} \cdot F_{13} \cdot P_{16}$
B	en serie	$P_3F_3 \rightarrow F_6P_6 \rightarrow P_9F_9 \rightarrow F_{12}P_{12} \rightarrow P_{15}F_{15} \rightarrow F_{18}P_{18}$	$V \rightarrow P_3$	$Y \rightarrow P_{18}$
	2 en ∥	$P_3F_3 \rightarrow F_6P_6 \rightarrow P_9F_9 \parallel F_{12}P_{12} \rightarrow P_{15}F_{15} \rightarrow F_{18}P_{18}$	$V \rightarrow P_3 \cdot F_{12}$	$Y \rightarrow F_9 \cdot P_{18}$
	3 en ∥	$P_3F_3 \rightarrow F_6P_6 \parallel P_9F_9 \rightarrow F_{12}P_{12} \parallel P_{15}F_{15} \rightarrow F_{18}P_{18}$	$V \rightarrow P_3 \cdot P_9 \cdot P_{15}$	$Y \rightarrow P_6 \cdot P_{12} \cdot P_{18}$
	6 en ∥	$P_3F_3 \parallel F_6P_6 \parallel P_9F_9 \parallel F_{12}P_{12} \parallel P_{15}F_{15} \parallel F_{18}P_{18}$	$V \rightarrow P_3 \cdot F_6 \cdot P_9 \cdot F_{12} \cdot P_{15} \cdot P_{18}$	$Y \rightarrow F_3 \cdot P_6 \cdot F_9 \cdot P_{12} \cdot F_{15} \cdot P_{18}$
C	en serie	$P_5F_5 \rightarrow F_8P_8 \rightarrow P_{11}F_{11} \rightarrow F_{14}P_{14} \rightarrow P_{17}F_{17} \rightarrow F_2P_2$	$W \rightarrow P_5$	$Z \rightarrow P_2$
	2 en ∥	$P_5F_5 \rightarrow F_8P_8 \rightarrow P_{11}F_{11} \parallel F_{14}P_{14} \rightarrow P_{17}F_{17} \rightarrow F_2P_2$	$W \rightarrow P_5 \cdot F_{14}$	$Z \rightarrow F_{11} \cdot P_2$
	3 en ∥	$P_5F_5 \rightarrow F_8P_8 \parallel P_{11}F_{11} \rightarrow F_{14}P_{14} \parallel P_{17}F_{17} \rightarrow F_2P_2$	$W \rightarrow P_8 \cdot P_{11} \cdot P_{17}$	$Z \rightarrow P_8 \cdot P_{14} \cdot P_2$
	6 en ∥	$P_5F_5 \parallel F_8P_8 \parallel P_{11}F_{11} \parallel F_{14}P_{14} \parallel P_{17}F_{17} \parallel F_2P_2$	$W \rightarrow P_5 \cdot F_8 \cdot P_{11} \cdot F_{14} \cdot P_{17} \cdot F_2$	$Z \rightarrow F_5 \cdot P_8 \cdot F_{11} \cdot P_{14} \cdot F_{17} \cdot P_2$

Conexión en estrella : $U \rightarrow R$, $V \rightarrow S$, $W \rightarrow T$
$X \rightarrow Y \rightarrow Z$ (punto neutro)

Conexión en triángulo : $U \rightarrow Z \rightarrow R$
$V \rightarrow X \rightarrow S$
$W \rightarrow Y \rightarrow T$

R, S y T son las tres fases de la línea de alimentación

TABLA DE CONEXIONES PARA A. DE POLOS ALTERNADOS $2p = 8$

Fases	Conexiones		Terminales
A	en serie	$P_1F_1 \to F_4P_4 \to P_7F_7 \to F_{10}P_{10} \to P_{13}F_{13} \to F_{16}P_{16} \to P_{19}F_{19} \to F_{22}P_{22}$	$U \to P_1$, $X \to P_{22}$
	2 en II	$P_1F_1 \to F_4P_4 \to P_7F_7 \to F_{10}P_{10} \parallel P_{13}F_{13} \to F_{16}P_{16} \to P_{19}F_{19} \to F_{22}P_{22}$	$U \to P_1 \cdot P_{13}$, $X \to P_{10} \cdot P_{22}$
	4 en II	$P_1F_1 \to F_4P_4 \parallel P_7F_7 \to F_{10}P_{10} \parallel P_{13}F_{13} \to F_{16}P_{16} \parallel P_{19}F_{19} \to F_{22}P_{22}$	$U \to P_1 \cdot P_7 \cdot P_{13} \cdot P_{19}$, $X \to P_4 \cdot P_{10} \cdot P_{16} \cdot P_{22}$
	8 en II	$P_1F_1 \parallel F_4P_4 \parallel P_7F_7 \parallel F_{10}P_{10} \parallel P_{13}F_{13} \parallel F_{16}P_{16} \parallel P_{19}F_{19} \parallel F_{22}P_{22}$	$U \to P_1 \cdot F_4 \cdot P_7 \cdot F_{10} \cdot P_{13} \cdot F_{16} \cdot P_{19} \cdot F_{22}$, $X \to F_1 \cdot P_4 \cdot F_7 \cdot P_{10} \cdot F_{13} \cdot P_{16} \cdot F_{19} \cdot P_{22}$
B	en serie	$P_3F_3 \to F_6P_6 \to P_9F_9 \to F_{12}P_{12} \to P_{15}F_{15} \to F_{18}P_{18} \to P_{21}F_{21} \to F_{24}P_{24}$	$V \to P_3$, $Y \to P_{24}$
	2 en II	$P_3F_3 \to F_6P_6 \to P_9F_9 \to F_{12}P_{12} \parallel P_{15}F_{15} \to F_{18}P_{18} \to P_{21}F_{21} \to F_{24}P_{24}$	$V \to P_3 \cdot P_{15}$, $Y \to P_{12} \cdot P_{24}$
	4 en II	$P_3F_3 \to F_6P_6 \parallel P_9F_9 \to F_{12}P_{12} \parallel P_{15}F_{15} \to F_{18}P_{18} \parallel P_{21}F_{21} \to F_{24}P_{24}$	$V \to P_3 \cdot P_9 \cdot P_{15} \cdot P_{21}$, $Y \to P_6 \cdot P_{12} \cdot P_{18} \cdot P_{24}$
	8 en II	$P_3F_3 \parallel F_6P_6 \parallel P_9F_9 \parallel F_{12}P_{12} \parallel P_{15}F_{15} \parallel F_{18}P_{18} \parallel P_{21}F_{21} \parallel F_{24}P_{24}$	$V \to P_3 \cdot F_6 \cdot P_9 \cdot F_{12} \cdot P_{15} \cdot F_{18} \cdot P_{21} \cdot F_{24}$, $Y \to F_3 \cdot P_6 \cdot F_9 \cdot P_{12} \cdot F_{15} \cdot P_{18} \cdot F_{21} \cdot P_{24}$
C	en serie	$P_5F_5 \to F_8P_8 \to P_{11}F_{11} \to F_{14}P_{14} \to P_{17}F_{17} \to F_{20}P_{20} \to P_{23}F_{23} \to F_2P_2$	$W \to P_5$, $Z \to P_2$
	2 en II	$P_5F_5 \to F_8P_8 \to P_{11}F_{11} \to F_{14}P_{14} \parallel P_{17}F_{17} \to F_{20}P_{20} \to P_{23}F_{23} \to F_2P_2$	$W \to P_5 \cdot P_{17}$, $Z \to P_{14} \cdot P_2$
	4 en II	$P_5F_5 \to F_8P_8 \parallel P_{11}F_{11} \to F_{14}P_{14} \parallel P_{17}F_{17} \to F_{20}P_{20} \parallel P_{23}F_{23} \to F_2P_2$	$W \to P_5 \cdot P_{11} \cdot P_{17} \cdot P_{23}$, $Z \to P_8 \cdot P_{14} \cdot P_{20} \cdot P_2$
	8 en II	$P_5F_5 \parallel F_8P_8 \parallel P_{11}F_{11} \parallel F_{14}P_{14} \parallel P_{17}F_{17} \parallel F_{20}P_{20} \parallel P_{23}F_{23} \parallel F_2P_2$	$W \to P_5 \cdot F_8 \cdot P_{11} \cdot F_{14} \cdot P_{17} \cdot F_{20} \cdot P_{23} \cdot F_2$, $Z \to F_5 \cdot P_8 \cdot F_{11} \cdot P_{14} \cdot F_{17} \cdot P_{20} \cdot F_{23} \cdot P_2$

Conexión en estrella : $U \to R$, $V \to S$, $W \to T$
$X \to Y \to Z$ (punto neutro)

Conexión en triángulo :
$U \to Z \to R$
$V \to X \to S$
$W \to Y \to T$

R, S y T son las tres fases de la red de alimentación

TABLA DE CONEXIONES PARA A. DE POLOS ALTERNADOS $2p = 10$

Fases	Conexiones		Terminales	
A	en serie	$P_1F_1 \to F_4P_4 \to P_7F_7 \to F_{10}P_{10} \to P_{13}F_{13} \to F_{16}P_{16} \to P_{19}F_{19} \to F_{22}P_{22} \to P_{25}F_{25} \to F_{28}P_{28}$	$U \to P_1$	$, X \to P_{28}$
	2 en ∥	$P_1F_1 \to F_4P_4 \to P_7F_7 \to F_{10}P_{10} \to P_{13}F_{13} \parallel F_{16}P_{16} \to P_{19}F_{19} \to F_{22}P_{22} \to P_{25}F_{25} \to F_{28}P_{28}$	$U \to P_1 \cdot F_{16}$	$, X \to F_{13} \cdot P_{28}$
	5 en ∥	$P_1F_1 \to F_4P_4 \parallel P_7F_7 \to F_{10}P_{10} \parallel P_{13}F_{13} \to F_{16}P_{16} \parallel P_{19}F_{19} \to F_{22}P_{22} \parallel P_{25}F_{25} \to F_{28}P_{28}$	$U \to P_1 \cdot P_7 \cdot P_{13} \cdot P_{19} \cdot P_{25}$	$, X \to P_4 \cdot P_{10} \cdot P_{16} \cdot P_{22} \cdot P_{28}$
	10 en ∥	$P_1F_1 \parallel F_4P_4 \parallel P_7F_7 \parallel F_{10}P_{10} \parallel P_{13}F_{13} \parallel F_{16}P_{16} \parallel P_{19}F_{19} \parallel F_{22}P_{22} \parallel P_{25}F_{25} \parallel F_{28}P_{28}$	$U \to P_1 \cdot F_4 \cdot P_7 \cdot F_{10} \cdot P_{13} \cdot F_{16} \cdot P_{19} \cdot F_{22} \cdot P_{25} \cdot F_{28}$	$, X \to F_1 \cdot P_4 \cdot F_7 \cdot P_{10} \cdot F_{13} \cdot P_{16} \cdot F_{19} \cdot P_{22} \cdot F_{25} \cdot P_{28}$
B	en serie	$P_3F_3 \to F_6P_6 \to P_9F_9 \to F_{12}P_{12} \to P_{15}F_{15} \to F_{18}P_{18} \to P_{21}F_{21} \to F_{24}P_{24} \to P_{27}F_{27} \to F_{30}P_{30}$	$V \to P_3$	$, Y \to P_{30}$
	2 en ∥	$P_3F_3 \to F_6P_6 \to P_9F_9 \to F_{12}P_{12} \to P_{15}F_{15} \parallel F_{18}P_{18} \to P_{21}F_{21} \to F_{24}P_{24} \to P_{27}F_{27} \to F_{30}P_{30}$	$V \to P_3 \cdot F_{18}$	$, Y \to F_{15} \cdot P_{30}$
	5 en ∥	$P_3F_3 \to F_6P_6 \parallel P_9F_9 \to F_{12}P_{12} \parallel P_{15}F_{15} \to F_{18}P_{18} \parallel P_{21}F_{21} \to F_{24}P_{24} \parallel P_{27}F_{27} \to F_{30}P_{30}$	$V \to P_3 \cdot P_9 \cdot P_{15} \cdot P_{21} \cdot P_{27}$	$, Y \to P_6 \cdot P_{12} \cdot P_{18} \cdot P_{24} \cdot P_{30}$
	10 en ∥	$P_3F_3 \parallel F_6P_6 \parallel P_9F_9 \parallel F_{12}P_{12} \parallel P_{15}F_{15} \parallel F_{18}P_{18} \parallel P_{21}F_{21} \parallel F_{24}P_{24} \parallel P_{27}F_{27} \parallel F_{30}P_{30}$	$V \to P_3 \cdot F_6 \cdot P_9 \cdot F_{12} \cdot P_{15} \cdot F_{18} \cdot P_{21} \cdot F_{24} \cdot P_{27} \cdot F_{30}$	$, Y \to F_3 \cdot P_6 \cdot F_9 \cdot P_{12} \cdot F_{15} \cdot P_{18} \cdot F_{21} \cdot P_{24} \cdot F_{27} \cdot P_{30}$
C	en serie	$P_5F_5 \to F_8P_8 \to P_{11}F_{11} \to F_{14}P_{14} \to P_{17}F_{17} \to F_{20}P_{20} \to P_{23}F_{23} \to F_{26}P_{26} \to P_{29}F_{29} \to F_2P_2$	$W \to P_5$	$, Z \to P_2$
	2 en ∥	$P_5F_5 \to F_8P_8 \to P_{11}F_{11} \to F_{14}P_{14} \to P_{17}F_{17} \parallel F_{20}P_{20} \to P_{23}F_{23} \to F_{26}P_{26} \to P_{29}F_{29} \to F_2P_2$	$W \to P_5 \cdot F_{20}$	$, Z \to F_{17} \cdot P_2$
	5 en ∥	$P_5F_5 \to F_8P_8 \parallel P_{11}F_{11} \to F_{14}P_{14} \parallel P_{17}F_{17} \to F_{20}P_{20} \parallel P_{23}F_{23} \to F_{26}P_{26} \parallel P_{29}F_{29} \to F_2P_2$	$W \to P_5 \cdot P_{11} \cdot P_{17} \cdot P_{23} \cdot P_{29}$	$, Z \to P_8 \cdot P_{14} \cdot P_{20} \cdot P_{26} \cdot P_2$
	10 en ∥	$P_5F_5 \parallel F_8P_8 \parallel P_{11}F_{11} \parallel F_{14}P_{14} \parallel P_{17}F_{17} \parallel F_{20}P_{20} \parallel P_{23}F_{23} \parallel F_{26}P_{26} \parallel P_{29}F_{29} \parallel F_2P_2$	$W \to P_5 \cdot F_8 \cdot P_{11} \cdot F_{14} \cdot P_{17} \cdot F_{20} \cdot P_{23} \cdot F_{26} \cdot P_{29} \cdot F_2$	$, Z \to F_5 \cdot P_8 \cdot F_{11} \cdot P_{14} \cdot F_{17} \cdot P_{20} \cdot F_{23} \cdot P_{26} \cdot F_{29} \cdot P_2$

Conexión en estrella : $U \to R$, $V \to S$, $W \to T$
$X \to Y \to Z$ (punto neutro)

Conexión en triángulo : $U \to Z \to R$
$V \to X \to S$
$W \to Y \to T$

R, S y T son las tres fases de la red de alimentación

TABLA DE CONEXIONES PARA A. DE POLOS ALTERNADOS 2p = 12

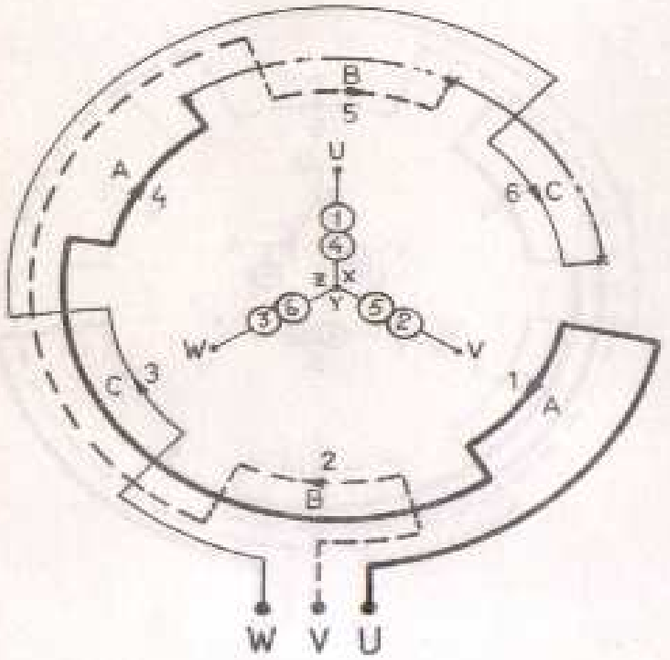
Fases	Conexiones		Terminales
A	en serie	$P_1F_1 \to F_4P_4 \to P_7F_7 \to F_{10}P_{10} \to P_{13}F_{13} \to F_{16}P_{16} \to P_{19}F_{19} \to F_{22}P_{22} \to P_{25}F_{25} \to F_{28}P_{28} \to P_{31}F_{31} \to F_{34}P_{34}$	$U \to P_1$, $X \to P_{34}$
	2 en ‖	$P_1F_1 \to F_4P_4 \to P_7F_7 \to F_{10}P_{10} \to P_{13}F_{13} \to F_{16}P_{16} \parallel P_{19}F_{19} \to F_{22}P_{22} \to P_{25}F_{25} \to F_{28}P_{28} \to P_{31}F_{31} \to F_{34}P_{34}$	$U \to P_1 \cdot P_{19}$, $X \to P_{16} \cdot P_{34}$
	3 en ‖	$P_1F_1 \to F_4P_4 \to P_7F_7 \to F_{10}P_{10} \parallel P_{13}F_{13} \to F_{16}P_{16} \parallel P_{19}F_{19} \to F_{22}P_{22} \parallel P_{25}F_{25} \to F_{28}P_{28} \to P_{31}F_{31} \to F_{34}P_{34}$	$U \to P_1 \cdot P_{13} \cdot P_{25}$, $X \to P_{10} \cdot P_{22} \cdot P_{34}$
	4 en ‖	$P_1F_1 \to F_4P_4 \to P_7F_7 \parallel F_{10}P_{10} \to P_{13}F_{13} \to F_{16}P_{16} \parallel P_{19}F_{19} \to F_{22}P_{22} \to P_{25}F_{25} \parallel F_{28}P_{28} \to P_{31}F_{31} \to F_{34}P_{34}$	$U \to P_1 \cdot P_{10} \cdot P_{19} \cdot F_{28}$, $X \to F_7 \cdot P_{16} \cdot F_{25} \cdot P_{34}$
	6 en ‖	$P_1F_1 \to F_4P_4 \parallel P_7F_7 \to F_{10}P_{10} \parallel P_{13}F_{13} \to F_{16}P_{16} \parallel P_{19}F_{19} \to F_{22}P_{22} \parallel P_{25}F_{25} \to F_{28}P_{28} \parallel P_{31}F_{31} \to F_{34}P_{34}$	$U \to P_1 \cdot P_7 \cdot P_{13} \cdot P_{19} \cdot P_{25} \cdot P_{31}$, $X \to P_4 \cdot P_{10} \cdot P_{16} \cdot P_{22} \cdot P_{28} \cdot P_{34}$
	12 en ‖	$P_1F_1 \parallel F_4P_4 \parallel P_7F_7 \parallel F_{10}P_{10} \parallel P_{13}F_{13} \parallel F_{16}P_{16} \parallel P_{19}F_{19} \parallel F_{22}P_{22} \parallel P_{25}F_{25} \parallel F_{28}P_{28} \parallel P_{31}F_{31} \parallel F_{34}P_{34}$	$U \to P_1 \cdot F_4 \cdot P_7 \cdot F_{10} \cdot P_{13} \cdot F_{16} \cdot P_{19} \cdot F_{22} \cdot P_{25} \cdot F_{28} \cdot P_{31} \cdot F_{34}$, $X \to F_1 \cdot P_4 \cdot F_7 \cdot P_{10} \cdot F_{13} \cdot P_{16} \cdot F_{19} \cdot P_{22} \cdot F_{25} \cdot P_{28} \cdot F_{31} \cdot P_{34}$
B	en serie	$P_3F_3 \to F_6P_6 \to P_9F_9 \to F_{12}P_{12} \to P_{15}F_{15} \to F_{18}P_{18} \to P_{21}F_{21} \to F_{24}P_{24} \to P_{27}F_{27} \to F_{30}P_{30} \to P_{33}F_{33} \to F_{36}P_{36}$	$V \to P_3$, $Y \to P_{36}$
	2 en ‖	$P_3F_3 \to F_6P_6 \to P_9F_9 \to F_{12}P_{12} \to P_{15}F_{15} \to F_{18}P_{18} \parallel P_{21}F_{21} \to F_{24}P_{24} \to P_{27}F_{27} \to F_{30}P_{30} \to P_{33}F_{33} \to F_{36}P_{36}$	$V \to P_3 \cdot P_{21}$, $Y \to P_{18} \cdot P_{36}$
	3 en ‖	$P_3F_3 \to F_6P_6 \to P_9F_9 \to F_{12}P_{12} \parallel P_{15}F_{15} \to F_{18}P_{18} \to P_{21}F_{21} \to F_{24}P_{24} \parallel P_{27}F_{27} \to F_{30}P_{30} \to P_{33}F_{33} \to F_{36}P_{36}$	$V \to P_3 \cdot P_{15} \cdot P_{27}$, $Y \to P_{12} \cdot P_{24} \cdot P_{36}$
	4 en ‖	$P_3F_3 \to F_6P_6 \to P_9F_9 \parallel F_{12}P_{12} \to P_{15}F_{15} \to F_{18}P_{18} \parallel P_{21}F_{21} \to F_{24}P_{24} \to P_{27}F_{27} \parallel F_{30}P_{30} \to P_{33}F_{33} \to F_{36}P_{36}$	$V \to P_3 \cdot F_{12} \cdot P_{21} \cdot F_{30}$, $Y \to F_9 \cdot P_{18} \cdot F_{27} \cdot P_{36}$
	6 en ‖	$P_3F_3 \to F_6P_6 \parallel P_9F_9 \to F_{12}P_{12} \parallel P_{15}F_{15} \to F_{18}P_{18} \parallel P_{21}F_{21} \to F_{24}P_{24} \parallel P_{27}F_{27} \to F_{30}P_{30} \parallel P_{33}F_{33} \to F_{36}P_{36}$	$V \to P_3 \cdot P_9 \cdot P_{15} \cdot P_{21} \cdot P_{27} \cdot P_{33}$, $Y \to P_6 \cdot P_{12} \cdot P_{18} \cdot P_{24} \cdot P_{30} \cdot P_{36}$
	12 en ‖	$P_3F_3 \parallel F_6P_6 \parallel P_9F_9 \parallel F_{12}P_{12} \parallel P_{15}F_{15} \parallel F_{18}P_{18} \parallel P_{21}F_{21} \parallel F_{24}P_{24} \parallel P_{27}F_{27} \parallel F_{30}P_{30} \parallel P_{33}F_{33} \parallel F_{36}P_{36}$	$V \to P_3 \cdot F_6 \cdot P_9 \cdot F_{12} \cdot P_{15} \cdot F_{18} \cdot P_{21} \cdot F_{24} \cdot P_{27} \cdot F_{30} \cdot P_{33} \cdot F_{36}$, $Y \to F_3 \cdot P_6 \cdot F_9 \cdot P_{12} \cdot F_{15} \cdot P_{18} \cdot F_{21} \cdot P_{24} \cdot F_{27} \cdot P_{30} \cdot F_{33} \cdot P_{36}$
C	en serie	$P_8F_8 \to F_{11}P_{11} \to F_{14}P_{14} \to P_{17}F_{17} \to F_{20}P_{20} \to P_{23}F_{23} \to F_{26}P_{26} \to P_{29}F_{29} \to F_{32}P_{32} \to P_{35}F_{35} \to F_2P_2$	$W \to P_8$, $Z \to P_2$
	2 en ‖	$P_8F_8 \to F_{11}P_{11} \to F_{14}P_{14} \to P_{17}F_{17} \to F_{20}P_{20} \parallel P_{23}F_{23} \to F_{26}P_{26} \to P_{29}F_{29} \to F_{32}P_{32} \to P_{35}F_{35} \to F_2P_2$	$W \to P_8 \cdot P_{23}$, $Z \to P_{20} \cdot P_2$
	3 en ‖	$P_8F_8 \to F_{11}P_{11} \to F_{14}P_{14} \parallel P_{17}F_{17} \to F_{20}P_{20} \to P_{23}F_{23} \to F_{26}P_{26} \parallel P_{29}F_{29} \to F_{32}P_{32} \to P_{35}F_{35} \to F_2P_2$	$W \to P_8 \cdot P_{17} \cdot P_{29}$, $Z \to P_{14} \cdot P_{26} \cdot P_2$
	4 en ‖	$P_8F_8 \to F_{11}P_{11} \parallel F_{14}P_{14} \to P_{17}F_{17} \to F_{20}P_{20} \parallel P_{23}F_{23} \to F_{26}P_{26} \to P_{29}F_{29} \parallel F_{32}P_{32} \to P_{35}F_{35} \to F_2P_2$	$W \to P_8 \cdot F_{14} \cdot P_{23} \cdot F_{32}$, $Z \to F_{11} \cdot P_{20} \cdot F_{29} \cdot P_2$
	6 en ‖	$P_8F_8 \to F_{11}P_{11} \parallel P_{14}F_{14} \to P_{17}F_{17} \parallel P_{20}F_{20} \to P_{23}F_{23} \parallel P_{26}F_{26} \to P_{29}F_{29} \parallel P_{32}F_{32} \to P_{35}F_{35} \to F_2P_2$	$W \to P_8 \cdot P_{14} \cdot P_{20} \cdot P_{26} \cdot P_{32} \cdot P_{35}$, $Z \to F_8 \cdot P_{11} \cdot F_{14} \cdot P_{17} \cdot F_{20} \cdot P_{23} \cdot F_{26} \cdot P_{29} \cdot F_{32} \cdot P_2$
	12 en ‖	$P_8F_8 \parallel F_{11}P_{11} \parallel P_{14}F_{14} \parallel P_{17}F_{17} \parallel P_{20}F_{20} \parallel P_{23}F_{23} \parallel P_{26}F_{26} \parallel P_{29}F_{29} \parallel P_{32}F_{32} \parallel P_{35}F_{35} \parallel F_2P_2$	$W \to P_8 \cdot F_{11} \cdot P_{14} \cdot F_{17} \cdot P_{20} \cdot F_{23} \cdot P_{26} \cdot F_{29} \cdot P_{32} \cdot F_{35} \cdot P_2$, $Z \to F_8 \cdot P_{11} \cdot F_{14} \cdot P_{17} \cdot F_{20} \cdot P_{23} \cdot F_{26} \cdot P_{29} \cdot F_{32} \cdot P_{35} \cdot F_2$

Conexión en estrella : U→R , V→S , W→T ; X→Y→Z (punto neutro)

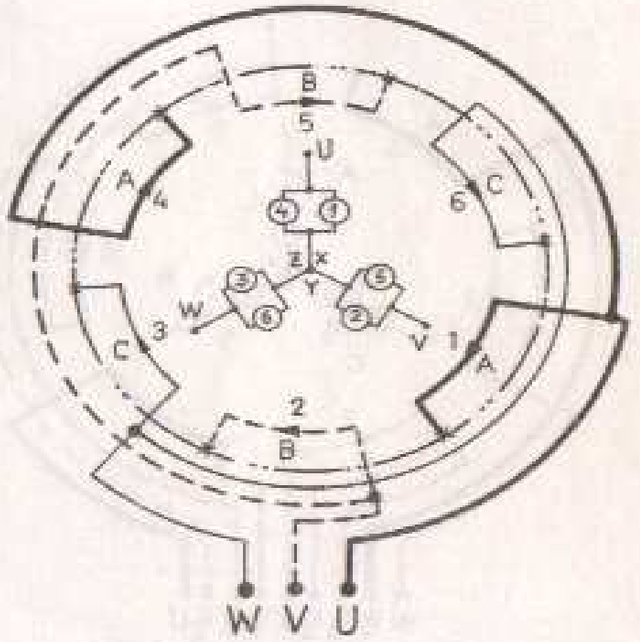
Conexión en triángulo : U→Z→R , V→X→S , W→Y→T

.. R, S y T son las tres fases de la línea de alimentación

2p=4. Polos consecuentes

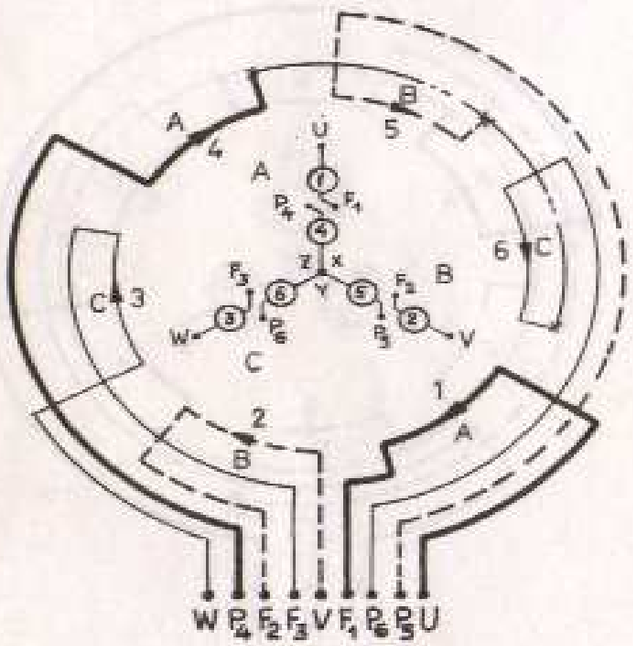


Conexión estrella serie



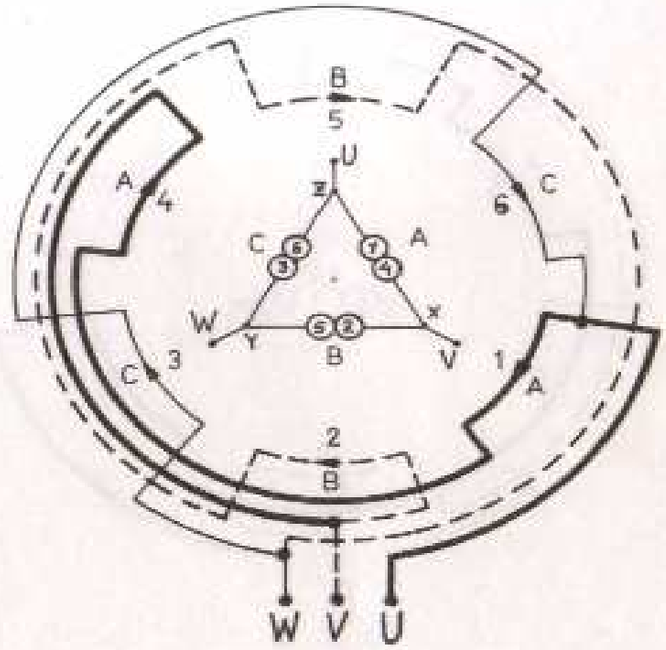
Conexión estrella doble paralelo

2p= 4. Polos consecuentes



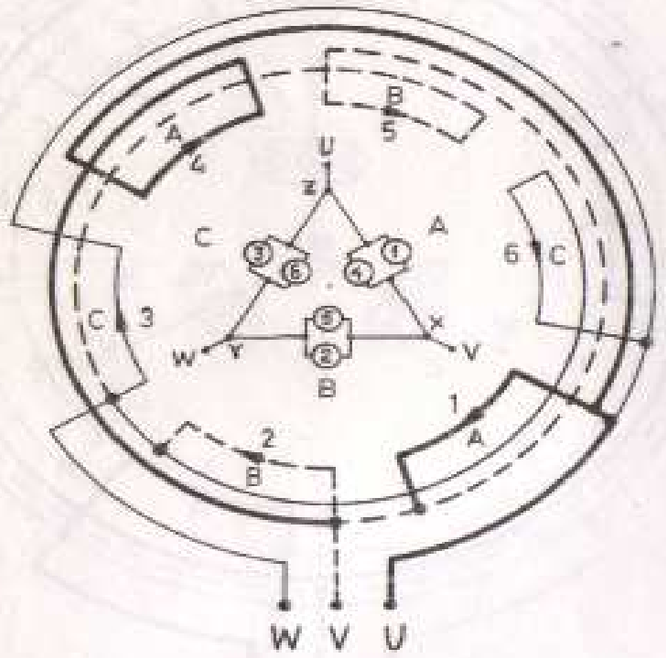
Conexión estrella serie : $F_1 \rightarrow P_4$, $F_2 \rightarrow P_5$, $F_3 \rightarrow P_6$

Conexión estrella doble paralelo : $U \rightarrow P_4$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_5$, $F_2 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_6$, $F_3 \rightarrow Z$

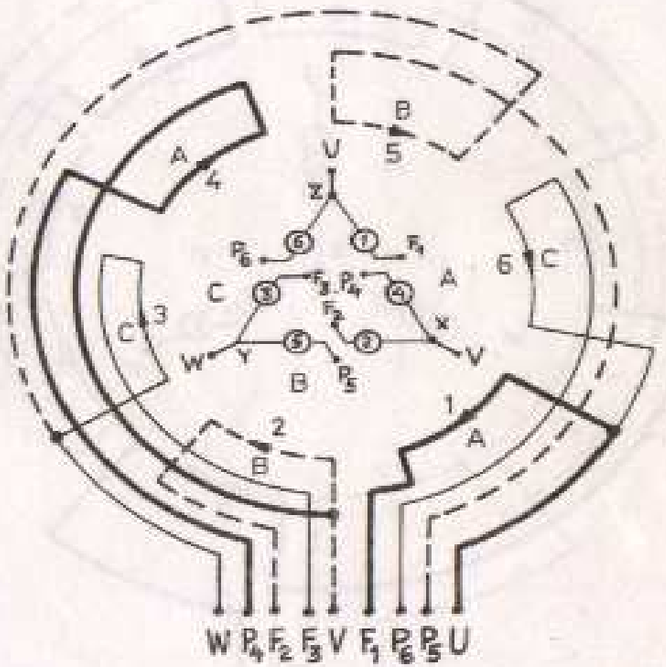


Conexión triángulo serie

2 p= 4. Polos consecuentes



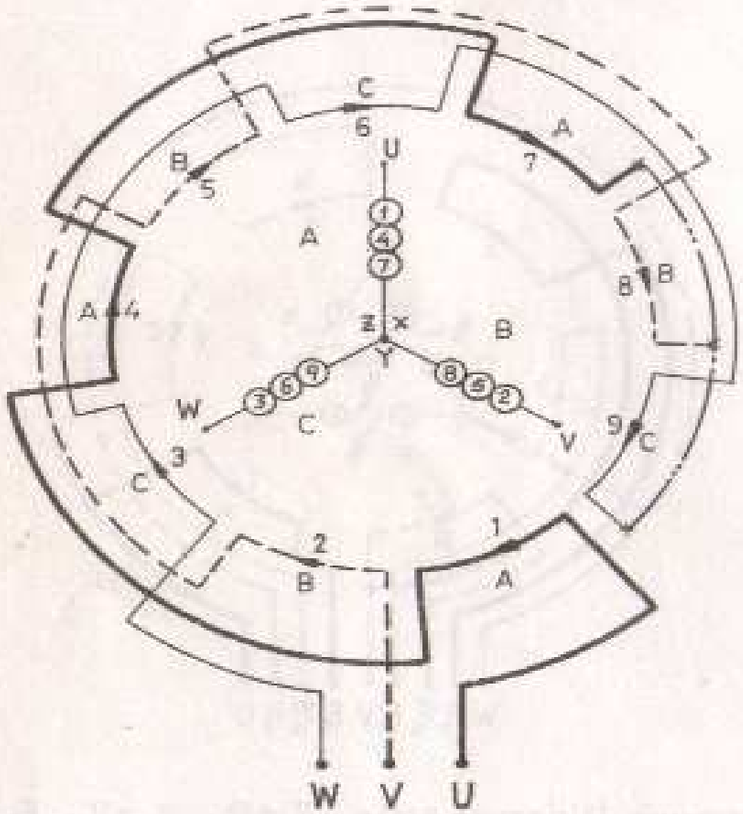
Conexión triángulo doble paralelo



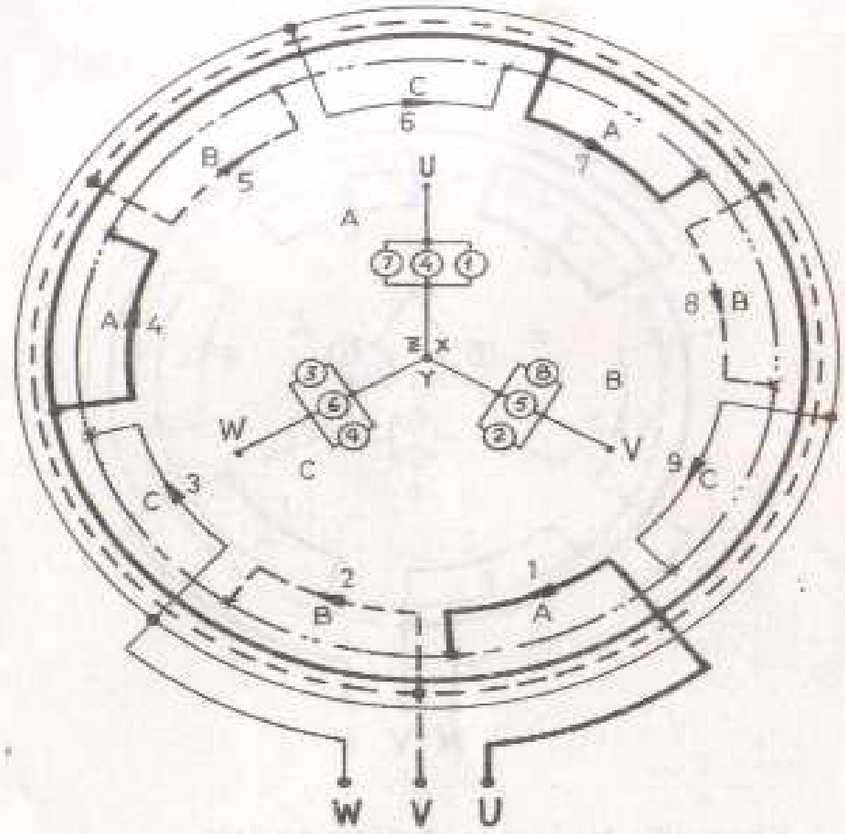
Conexión triángulo serie: $F_1 \rightarrow P_4$, $F_2 \rightarrow P_5$, $F_3 \rightarrow P_6$

Conexión triángulo doble paralelo: $U \rightarrow P_4$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_5$, $F_2 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_6$, $F_3 \rightarrow Z$

2p=6. Polos consecuentes

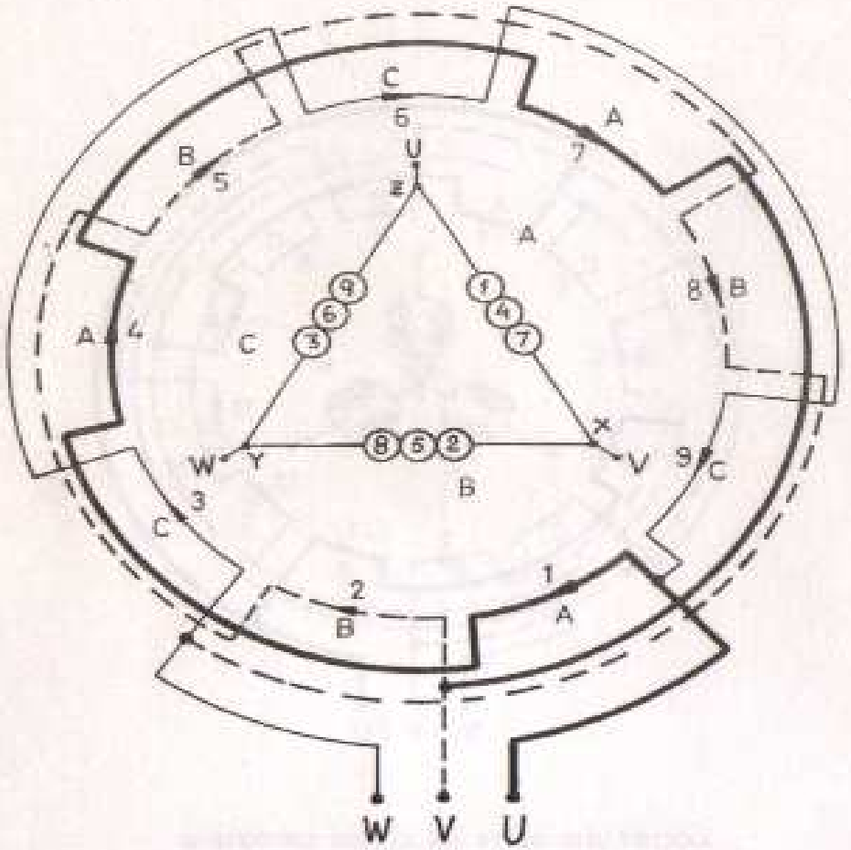


Conexión estrella serie

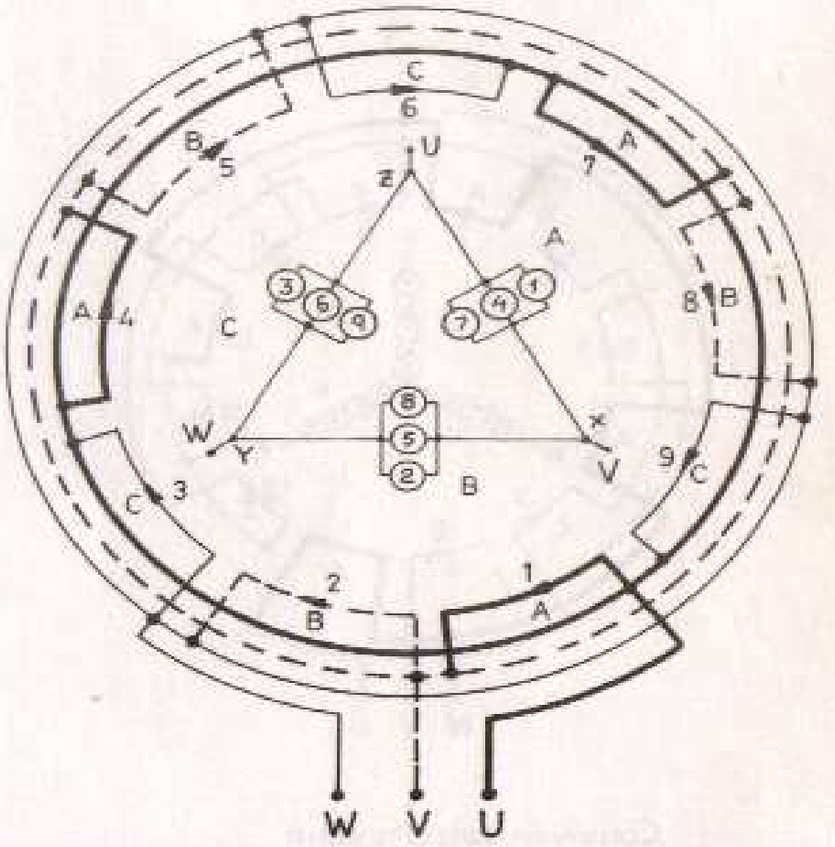


Conexión estrella triple paralelo

2p=6. Polos consecuentes

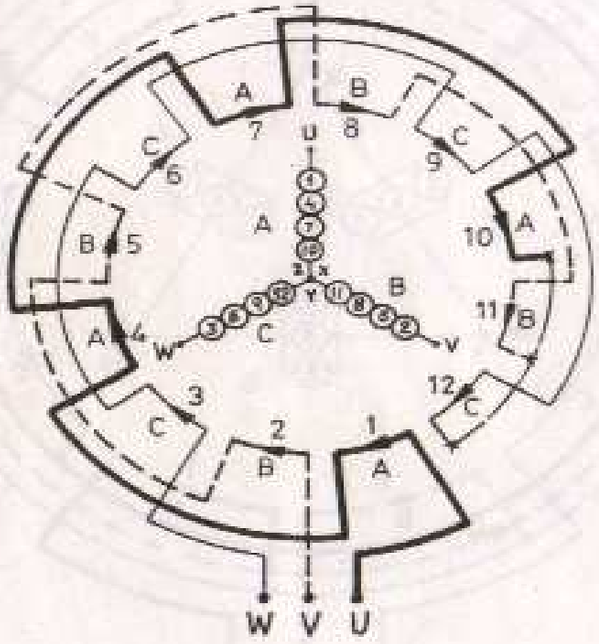


Conexión triángulo serie

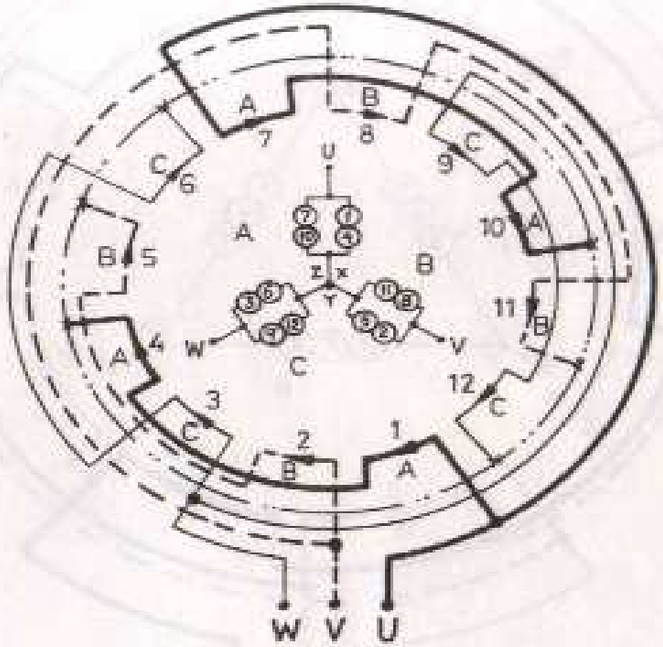


Conexión triángulo triple paralelo

2p = 8. Polos consecuentes



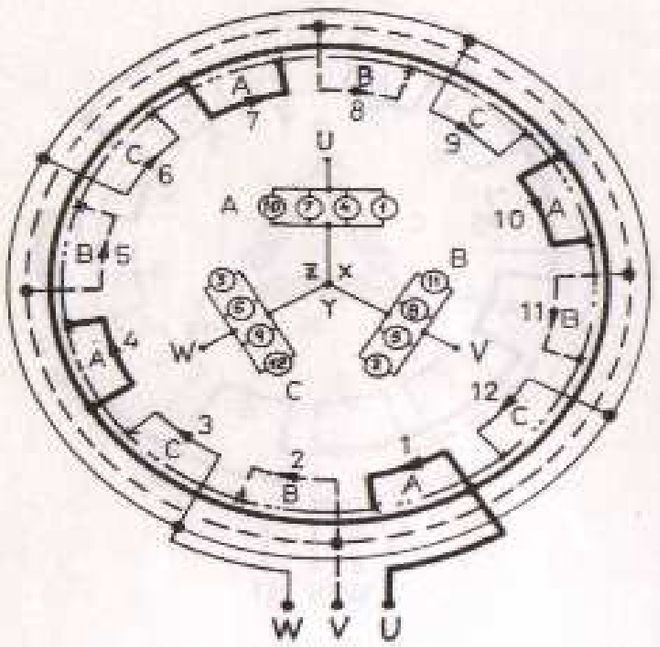
Conexión estrella serie



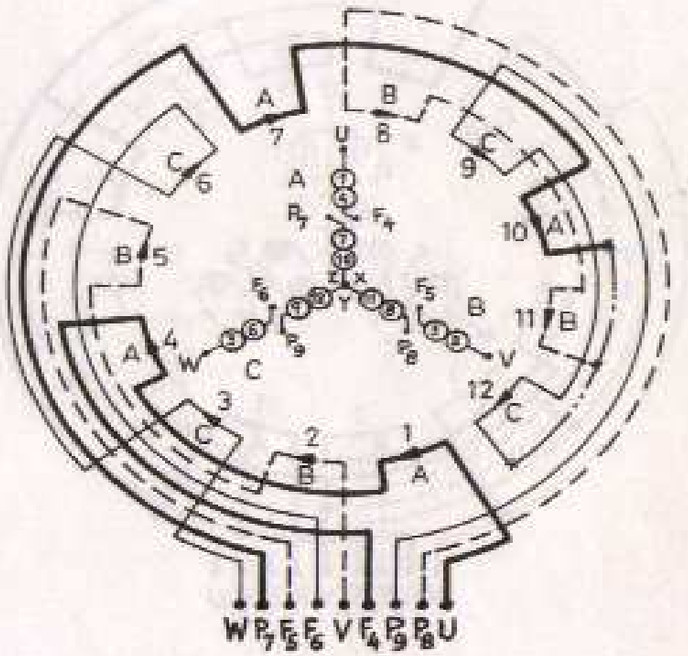
Conexión estrella doble paralelo

„Sofir-Randbruch"

2p=8. Polos consecuentes



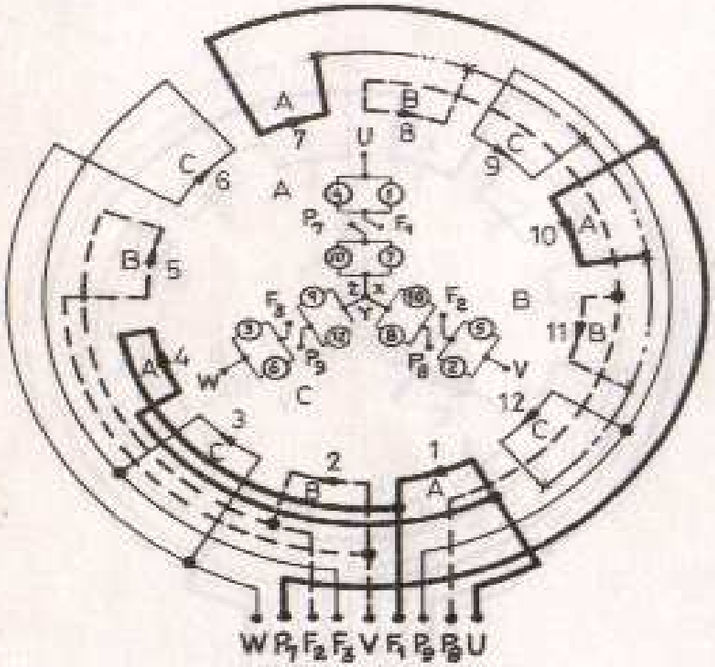
Conexión estrella cuádruple paralelo



Conexión estrella serie: $F_4 \rightarrow P_7$, $F_5 \rightarrow P_8$, $F_6 \rightarrow P_9$

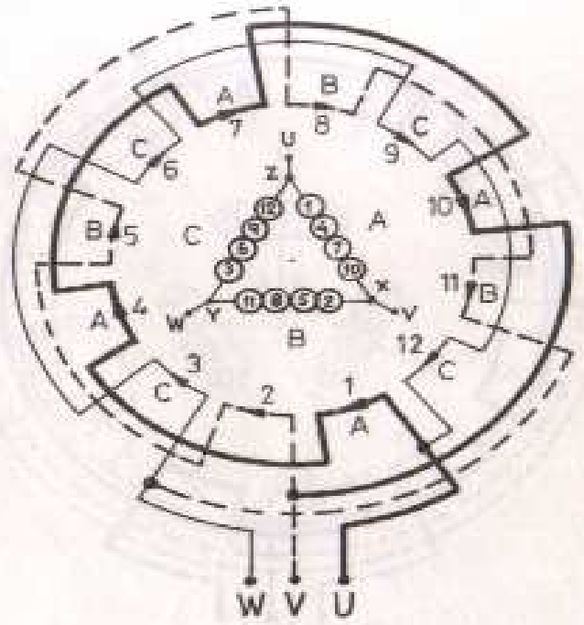
Conexión estrella doble paralelo: $U \rightarrow P_7$, $F_4 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_8$, $F_5 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_9$, $F_6 \rightarrow Z$

2p = 8. Polos consecuentes



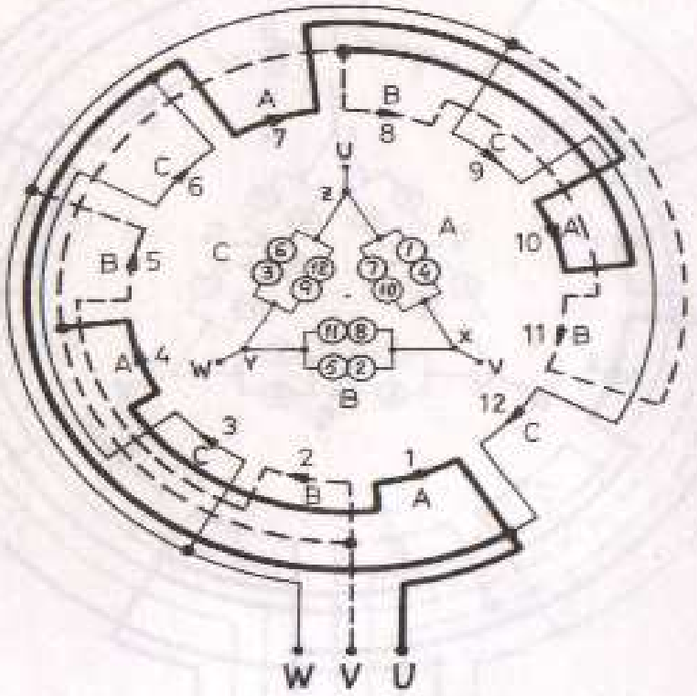
Conexión estrella doble paralelo: $F_1 \rightarrow P_7$, $F_2 \rightarrow P_8$, $F_3 \rightarrow P_9$

Conexión estrella cuádruple paralelo: $U \rightarrow P_7$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_8$, $F_2 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_9$, $F_3 \rightarrow Z$

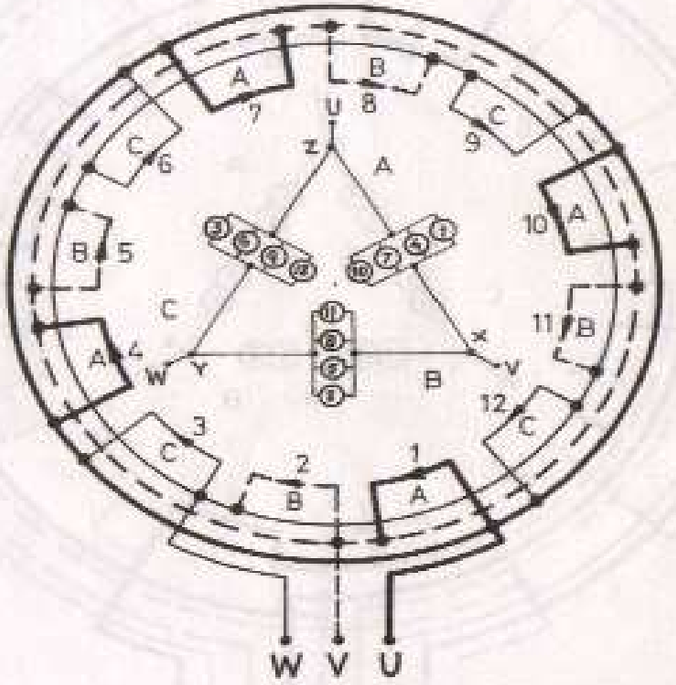


Conexión triángulo serie

2p=8. Polos consecuentes

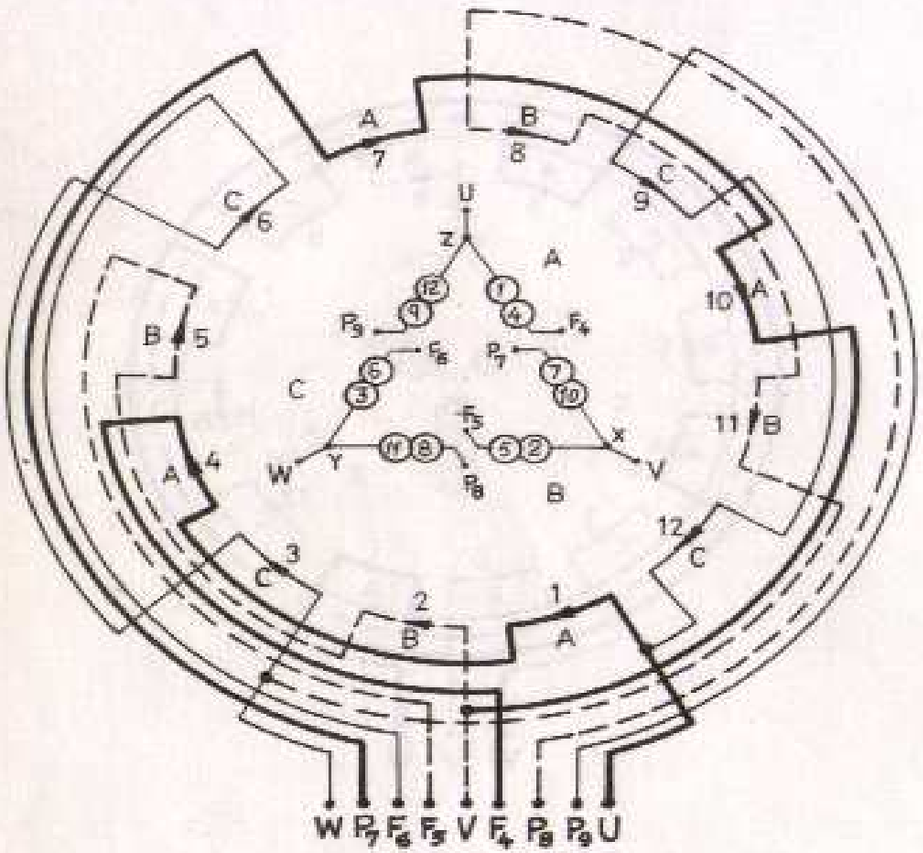


Conexión triángulo doble paralelo

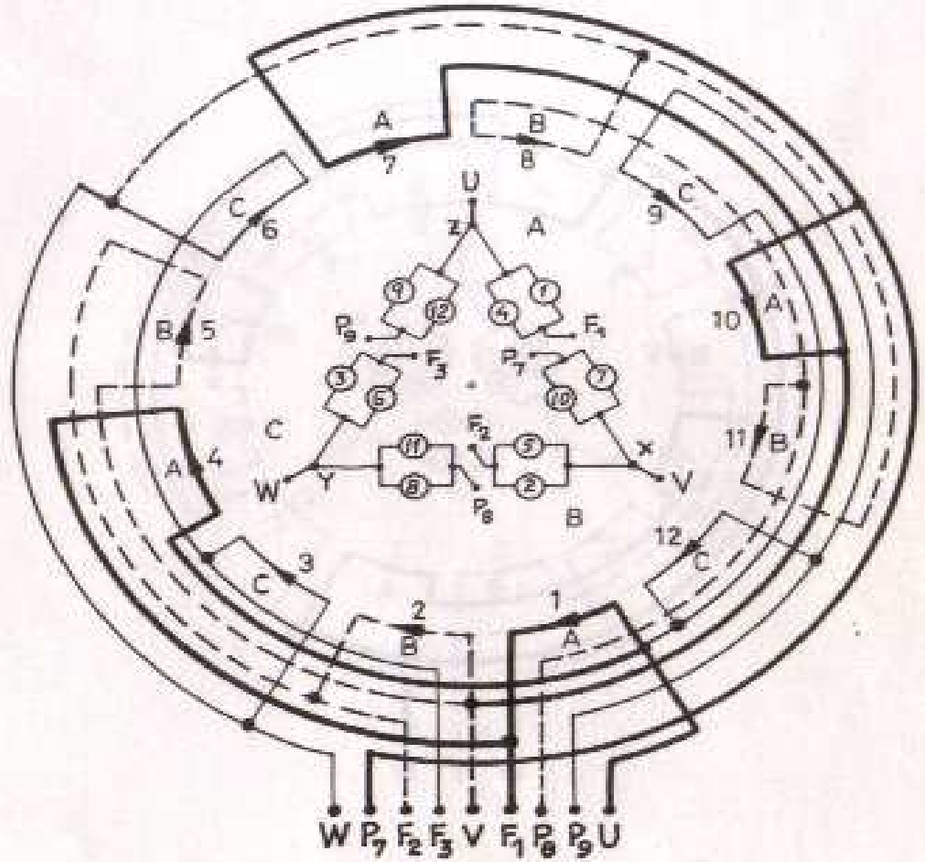


Conexión triángulo cuádruple paralelo

2p = 8. Polos consecuentes

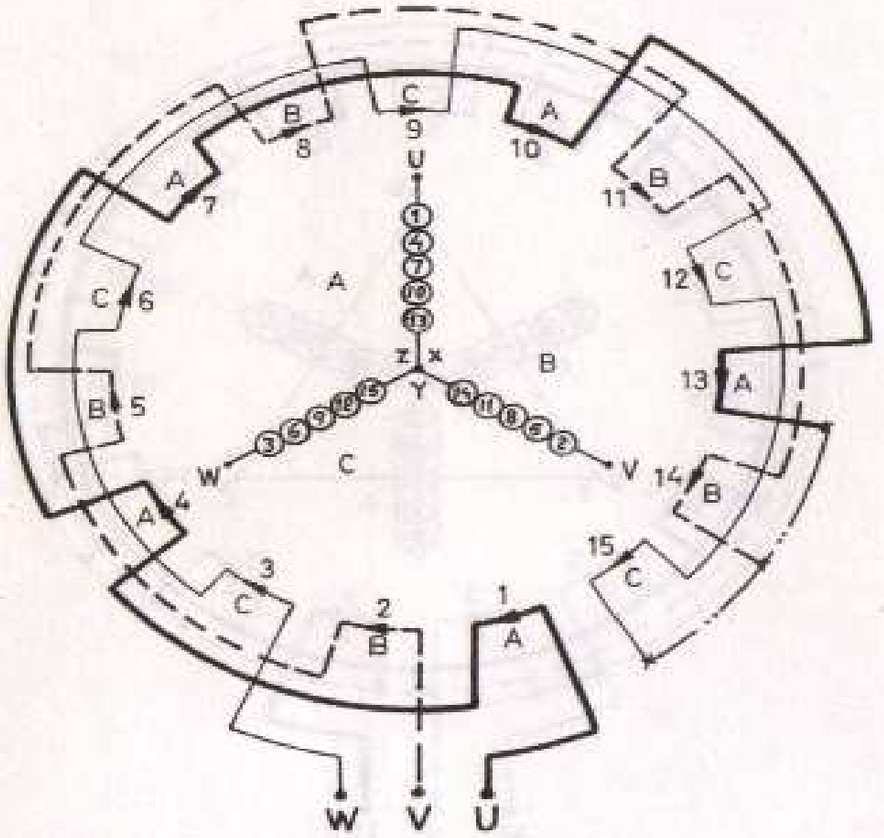


Conexión triángulo serie: $F_4 \rightarrow P_7$, $F_5 \rightarrow P_8$, $F_6 \rightarrow P_9$
Conexión triángulo doble paralelo: $U \rightarrow P_7$, $F_4 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_8$, $F_5 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_9$, $F_6 \rightarrow Z$

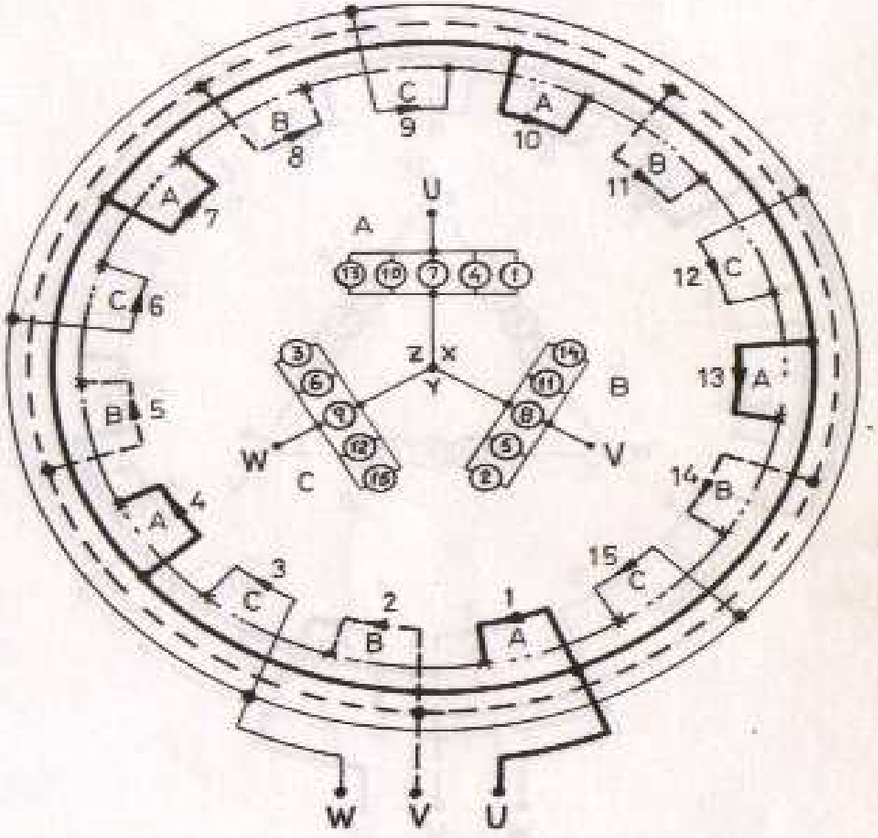


Conexión triángulo doble paralelo: $F_1 \rightarrow P_7$, $F_2 \rightarrow P_8$, $F_3 \rightarrow P_9$
Conexión triángulo cuádruple paralelo: $U \rightarrow P_7$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_8$, $F_2 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_9$, $F_3 \rightarrow Z$

2p=10. Polos consecuentes

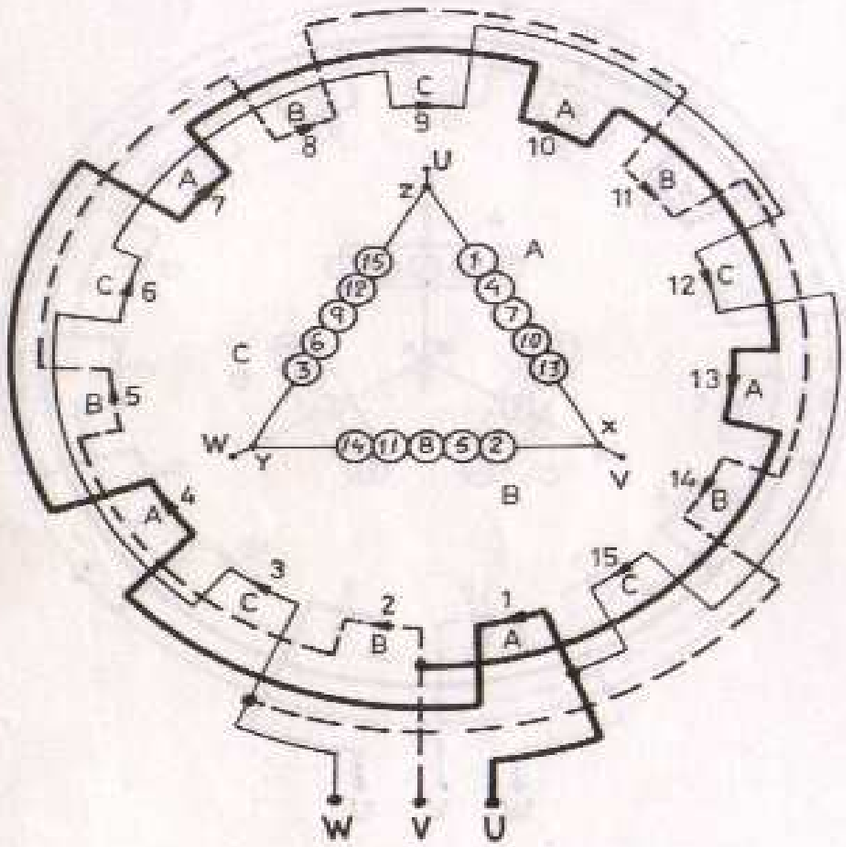


Conexión estrella serie

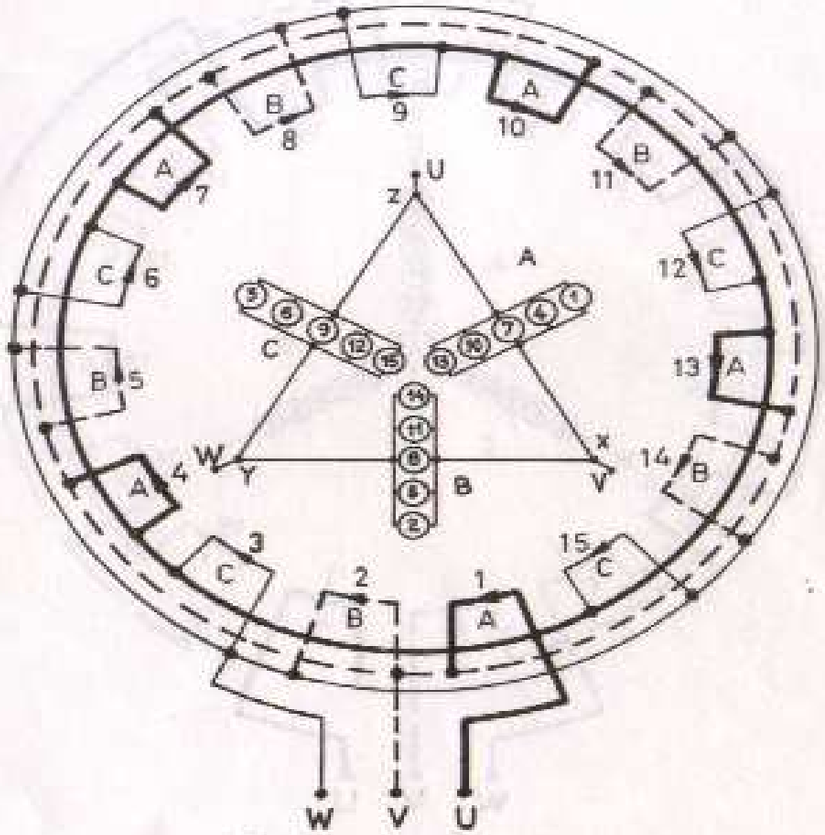


Conexión estrella quíntuple paralelo

2p=10. Polos consecuentes

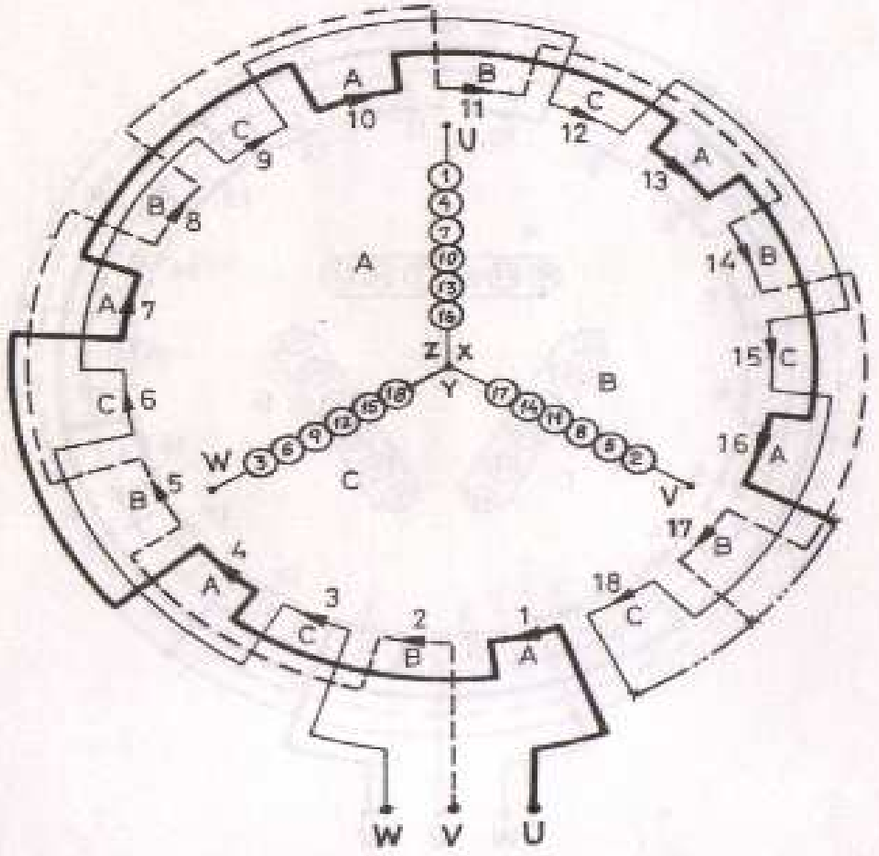


Conexión triángulo serie

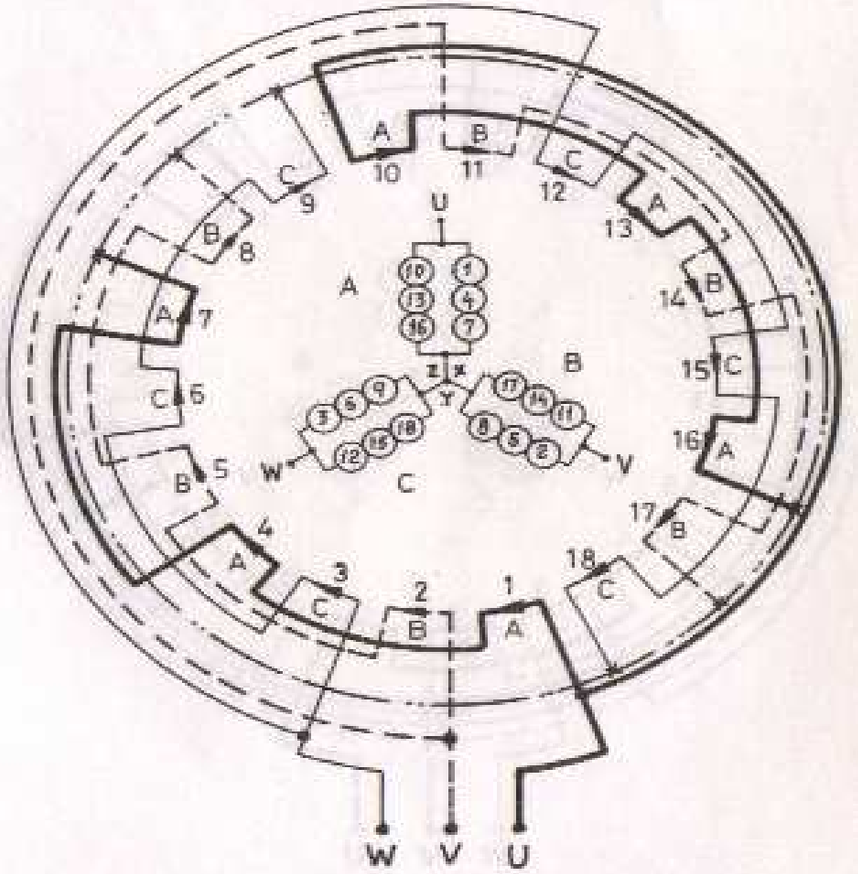


Conexión triángulo quíntuple paralelo

2p=12. Polos consecuentes

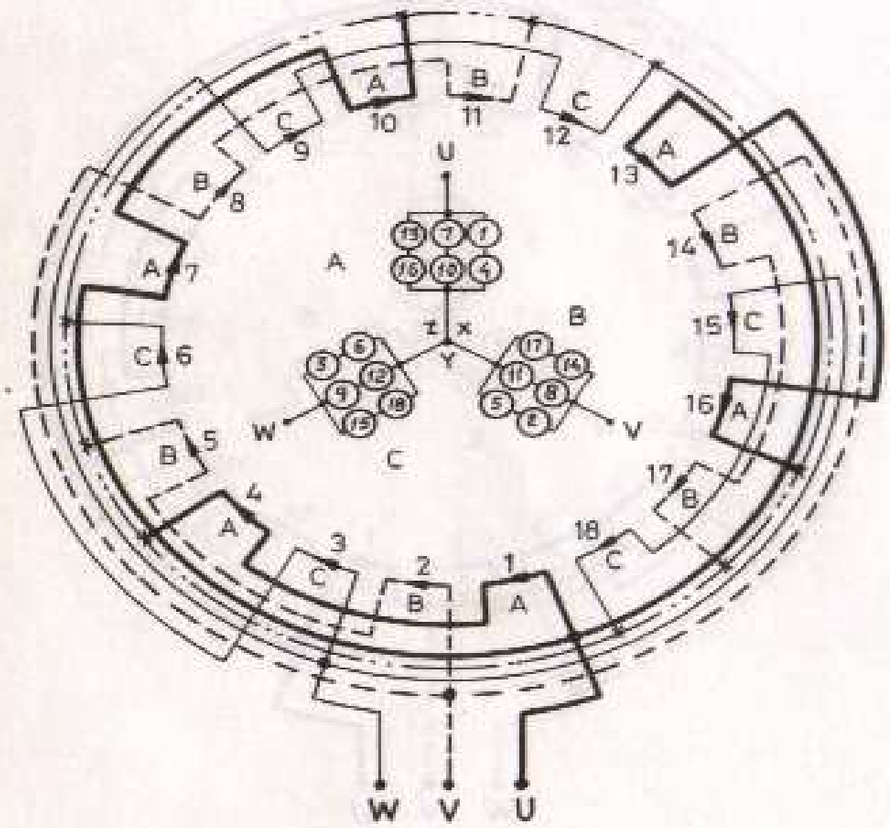


Conexión estrella serie

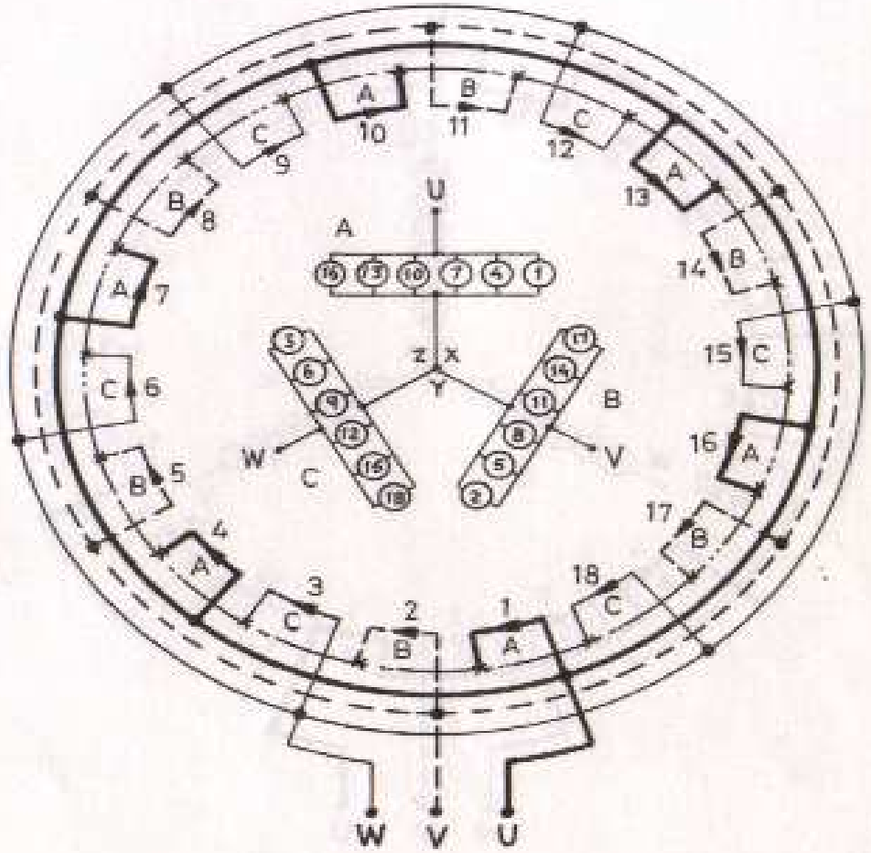


Conexión estrella doble paralelo

2p=12. Polos consecuentes

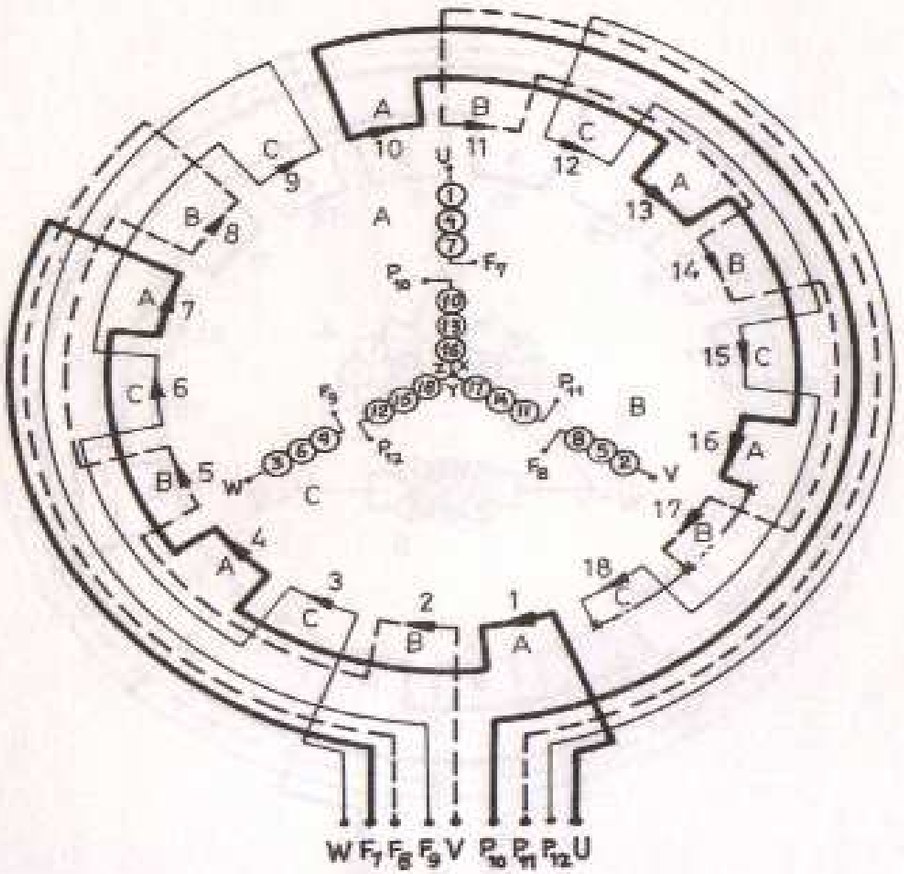


Conexión estrella triple paralelo

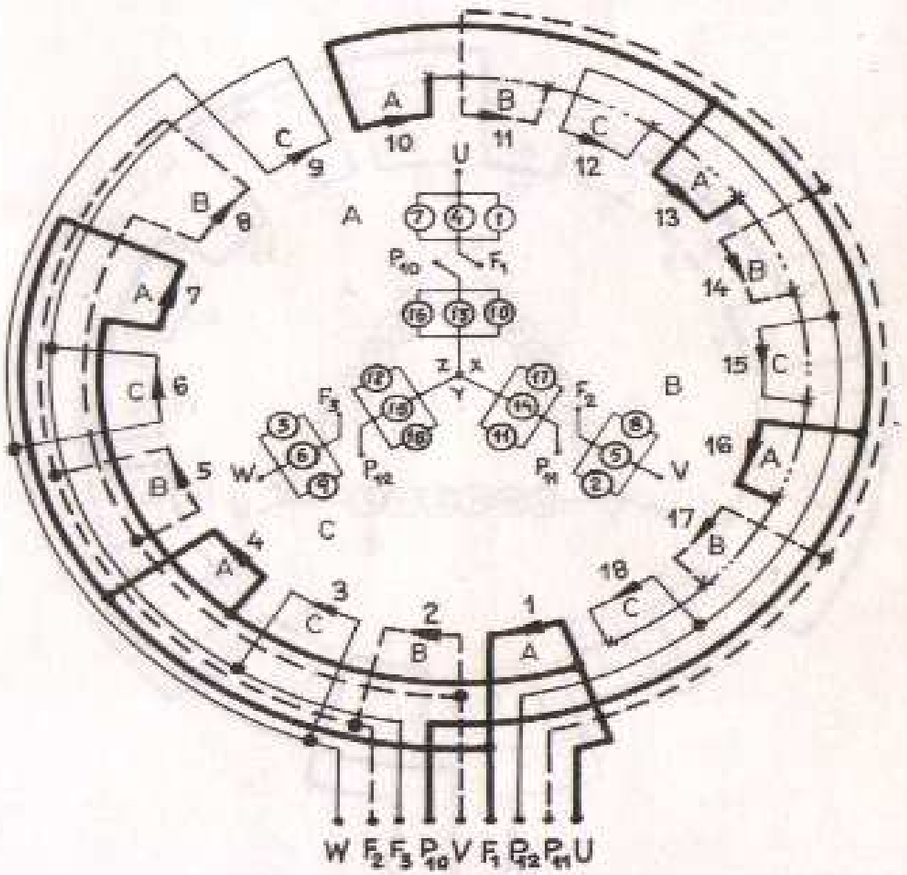


Conexión estrella séxtuple paralelo

2p = 12. Polos consecuentes

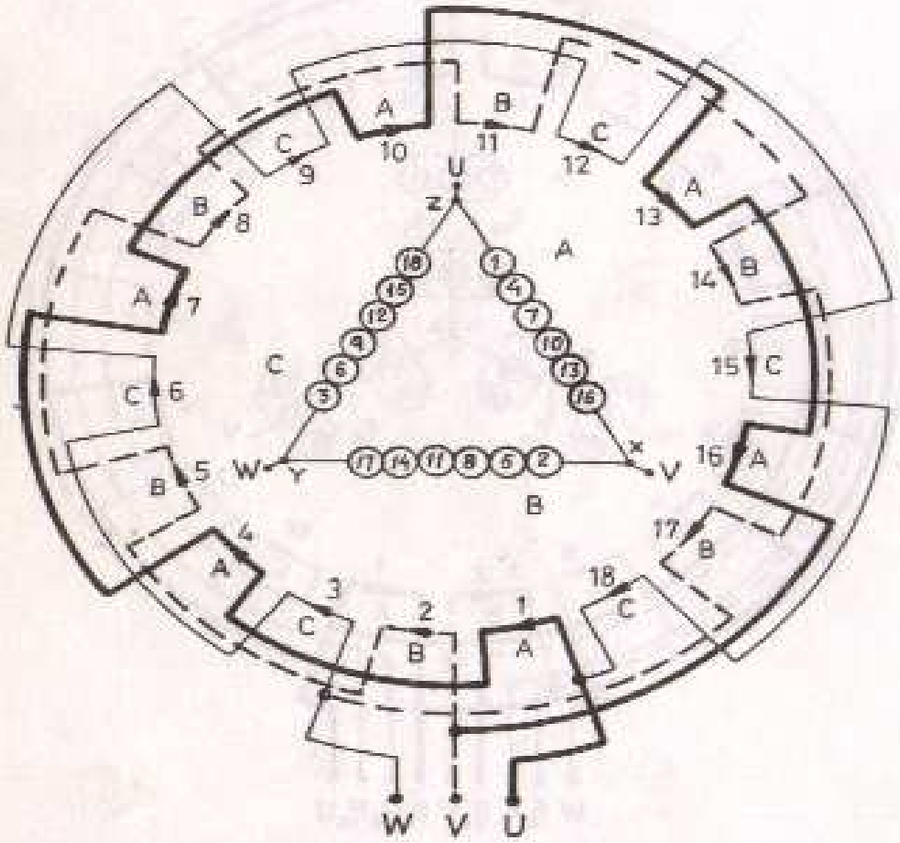


Conexión estrella serie: $F_7 \rightarrow P_{10}$, $F_8 \rightarrow P_{11}$, $F_9 \rightarrow P_{12}$
Conexión estrella doble paralelo: $U \rightarrow P_{10}$, $F_7 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{11}$, $F_8 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{12}$, $F_9 \rightarrow Z$

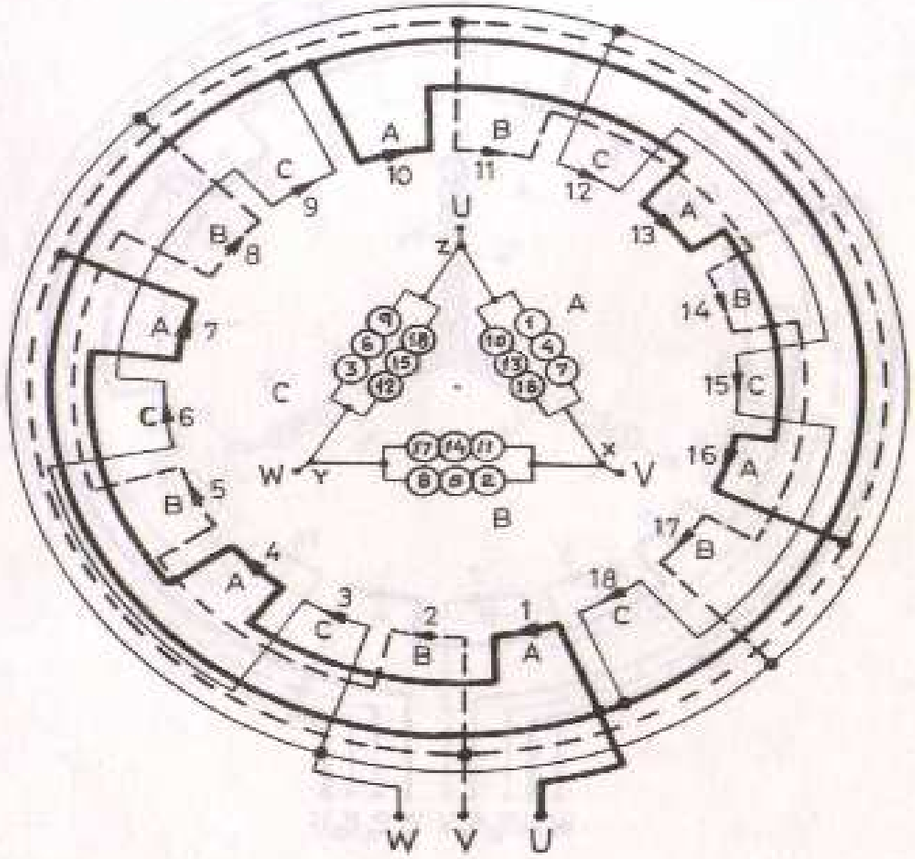


Conexión estrella triple paralelo: $F_1 \rightarrow P_{10}$, $F_2 \rightarrow P_{11}$, $F_3 \rightarrow P_{12}$
Conexión estrella séxtuple paralelo: $U \rightarrow P_{10}$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{11}$, $F_2 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{12}$, $F_3 \rightarrow Z$

2p=12. Polos consecuentes

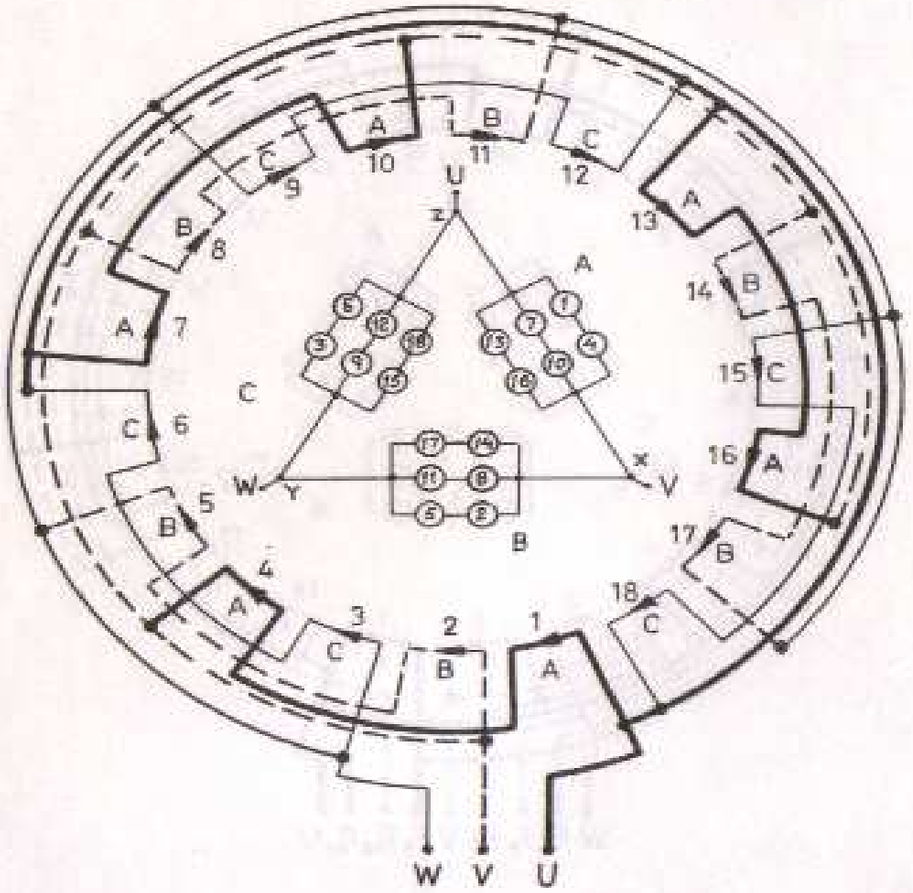


Conexión triángulo serie

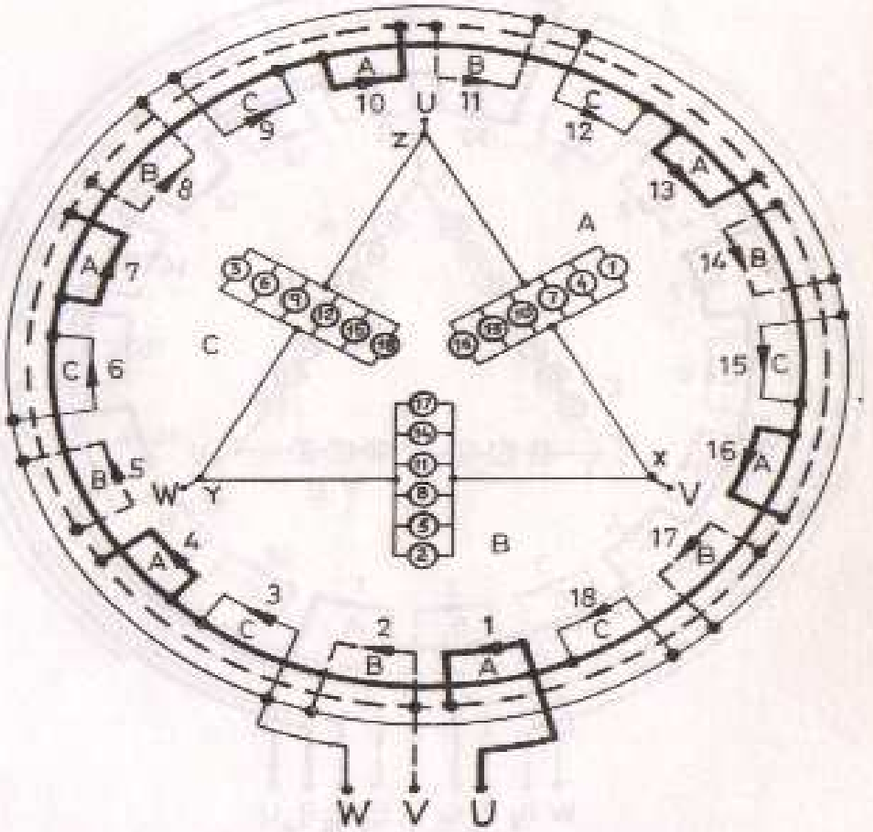


Conexión triángulo doble paralelo

2p=12. Polos consecuentes

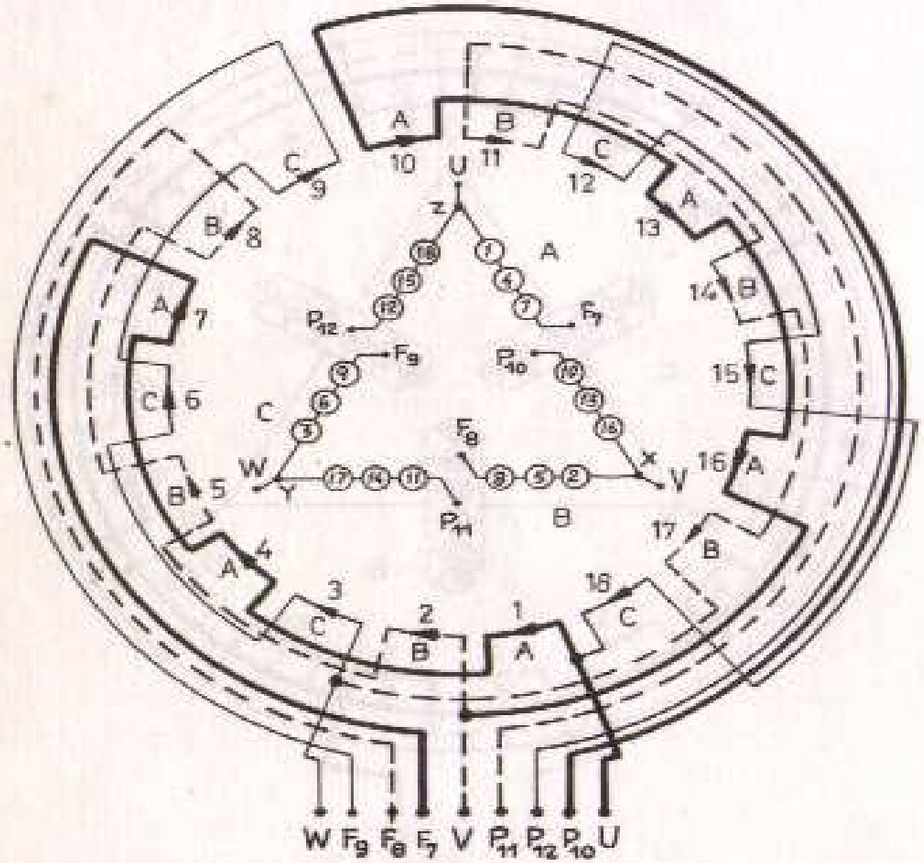


Conexión triángulo triple paralelo

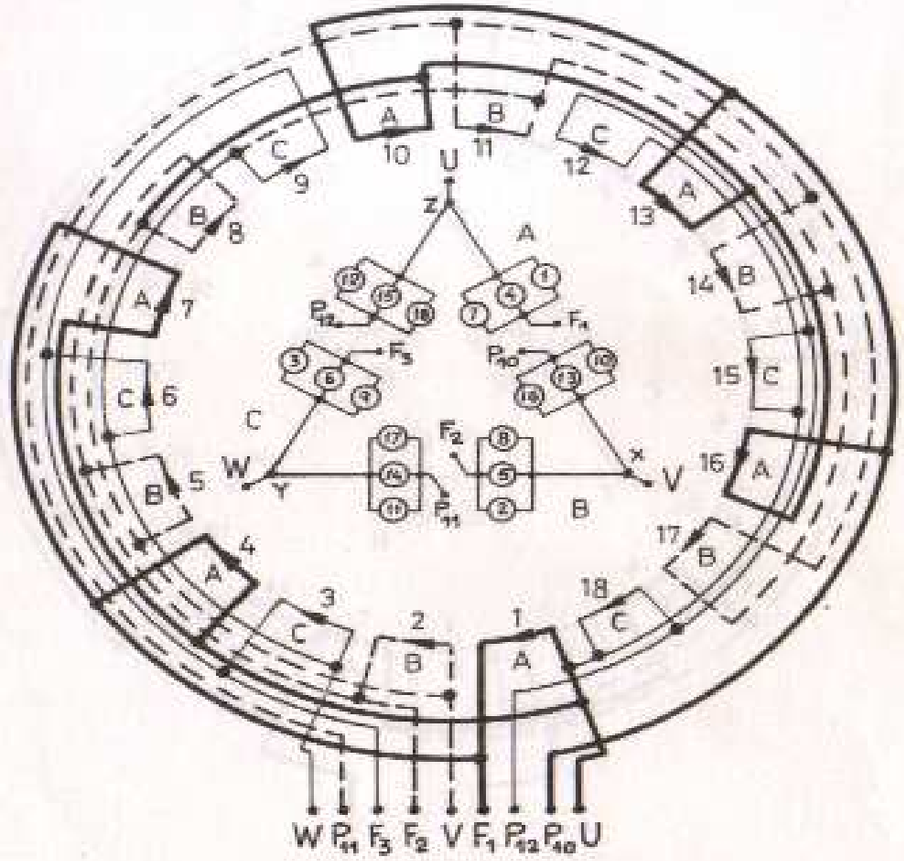


Conexión triángulo séxtuple paralelo

2p=12. Polos consecuentes

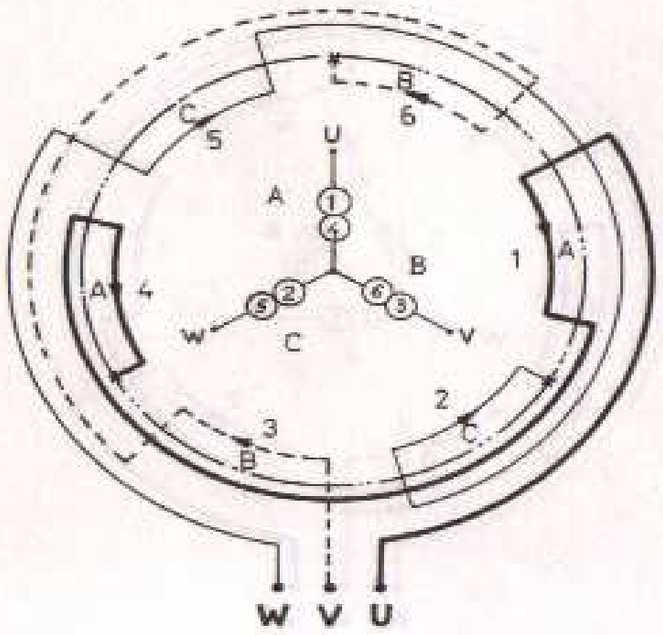


Conexión triángulo serie : $F_7 \rightarrow P_{10}$, $F_8 \rightarrow P_{11}$, $F_9 \rightarrow P_{12}$
Conexión triángulo doble paralelo: $U \rightarrow P_{10}$, $F_7 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{11}$, $F_8 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{12}$, $F_9 \rightarrow Z$

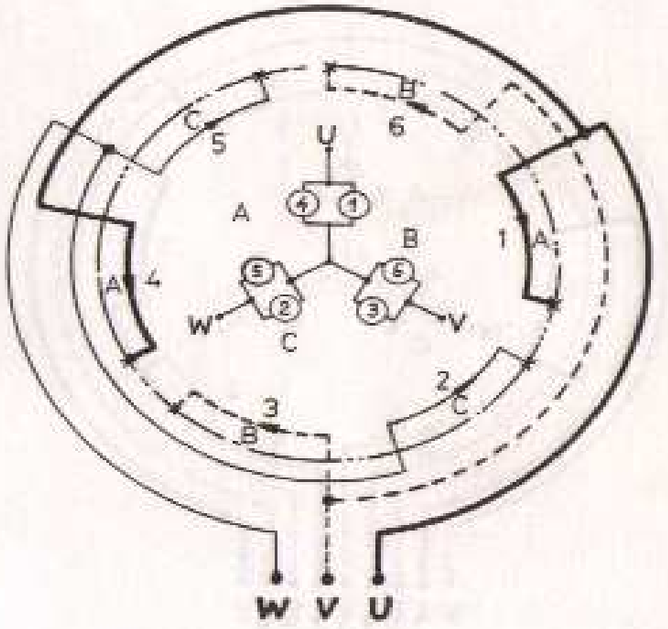


Conexión triángulo doble paralelo: $F_1 \rightarrow P_{10}$, $F_2 \rightarrow P_{11}$, $F_3 \rightarrow P_{12}$
Conexión triángulo séxtuple paralelo : $U \rightarrow P_{10}$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{11}$, $F_2 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{12}$, $F_3 \rightarrow Z$

$2p = 2$. Polos alternados

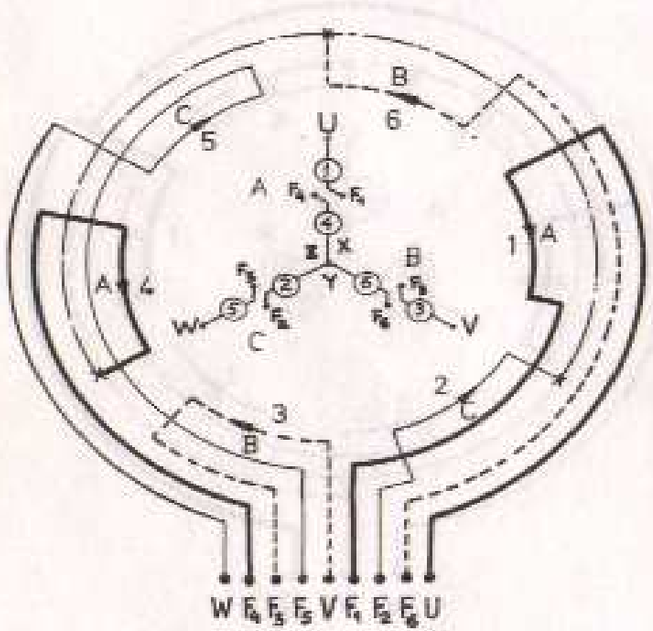


Conexión estrella serie



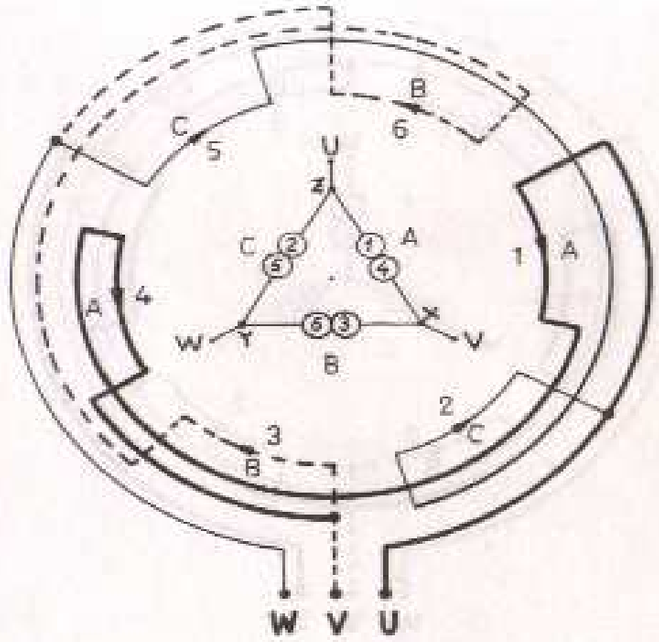
Conexión estrella doble paralelo

2p = 2 . Polos alternados



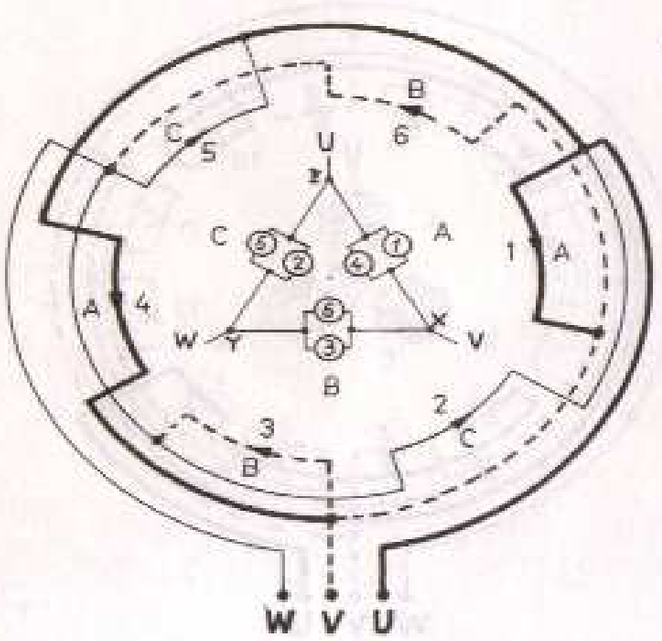
Conexión estrella serie : $F_1 \rightarrow F_4$, $F_3 \rightarrow F_6$, $F_5 \rightarrow F_2$

Conexión estrella doble paralelo : $U \rightarrow F_4$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow F_6$, $F_3 \rightarrow Y$
$W \rightarrow F_2$, $F_5 \rightarrow Z$

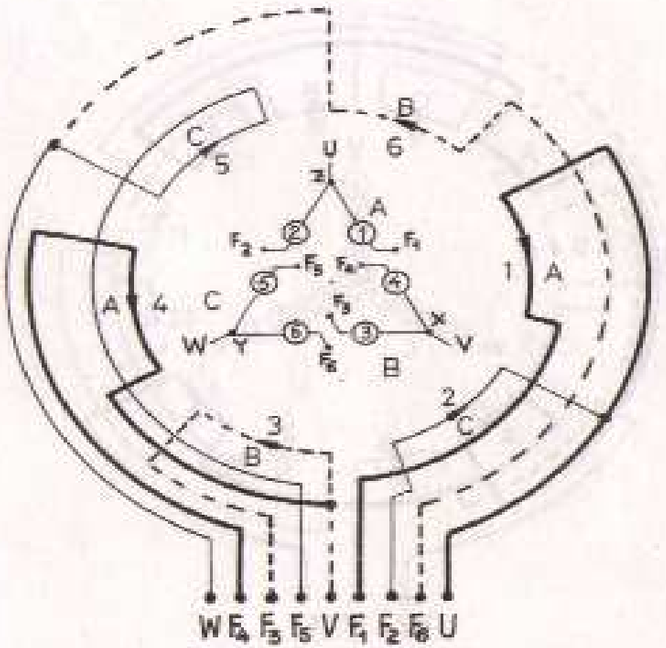


Conexión triángulo serie

2p=2. Polos alternados



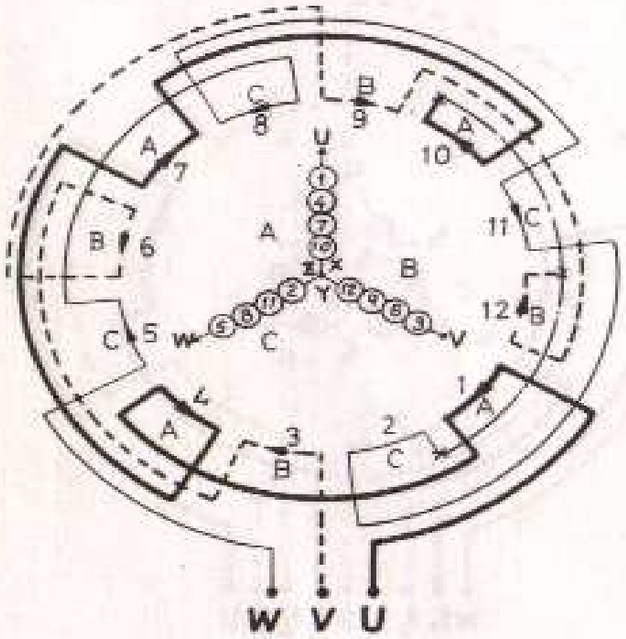
Conexión triángulo doble paralelo



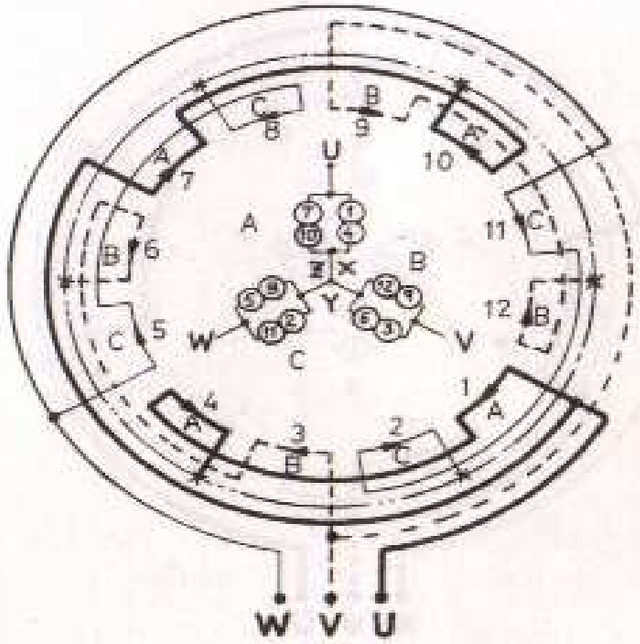
Conexión triángulo serie : $F_1 \rightarrow F_4$, $F_3 \rightarrow F_6$, $F_5 \rightarrow F_2$

Conexión triángulo doble paralelo : $U \rightarrow F_4$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow F_6$, $F_3 \rightarrow Y$
$W \rightarrow F_2$, $F_5 \rightarrow Z$

2p=4. Polos alternados

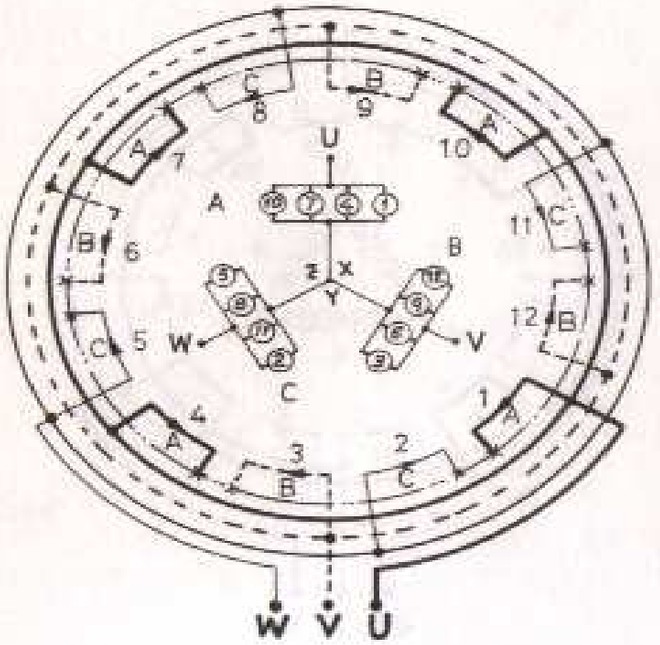


Conexión estrella serie

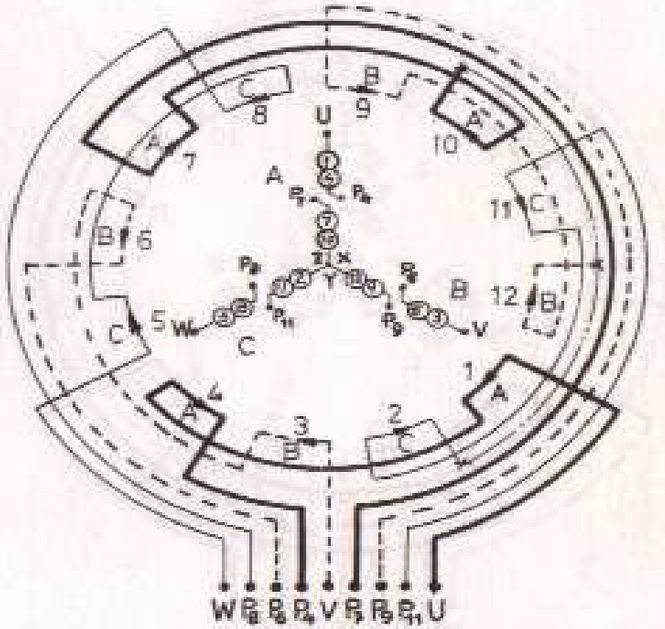


Conexión estrella doble paralelo

2p = 4. Polos alternados



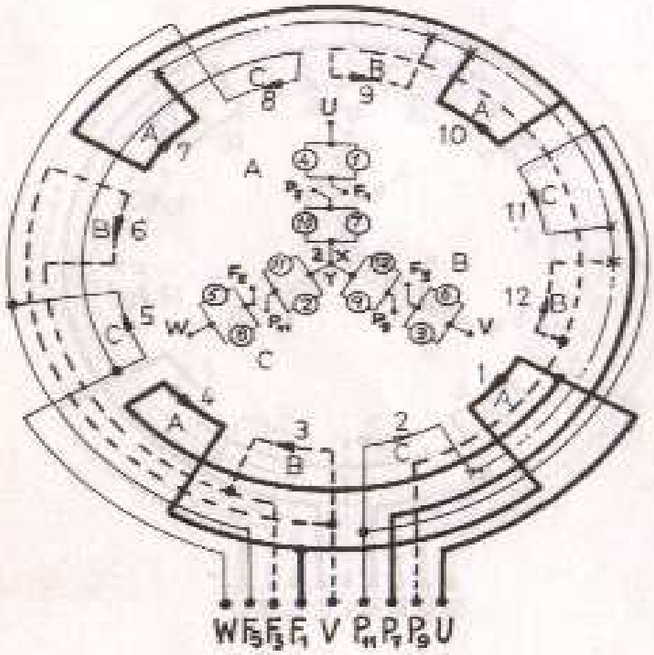
Conexión estrella cuádruple paralelo



Conexión estrella serie : $P_4 \rightarrow P_7$, $P_6 \rightarrow P_9$, $P_8 \rightarrow P_{11}$

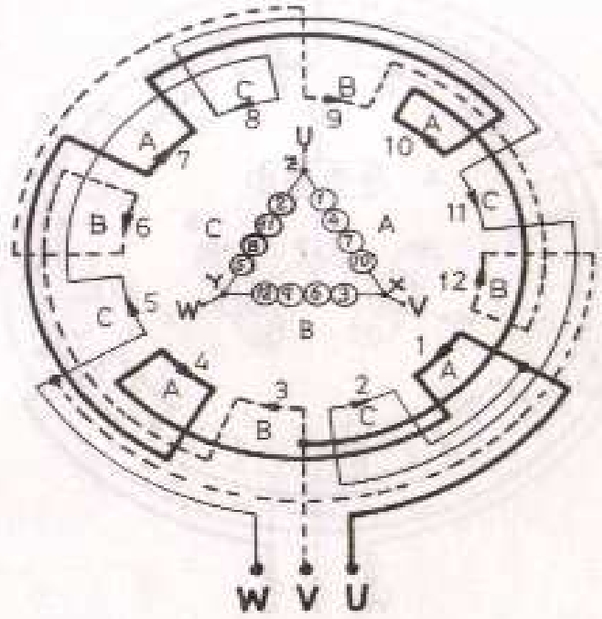
Conexión estrella doble paralelo : $U \rightarrow P_7$, $P_4 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_9$, $P_6 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{11}$, $P_8 \rightarrow Z$

2p=4. Polos alternados



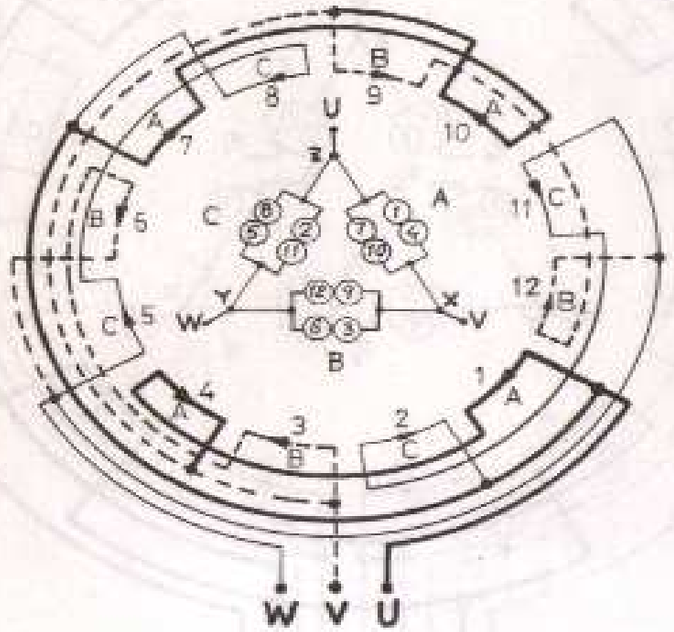
Conexión estrella doble paralelo: $F_1 \rightarrow P_7$, $F_3 \rightarrow P_9$, $F_5 \rightarrow P_{11}$

Conexión estrella cuádruple paralelo: $U \rightarrow P_9$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{11}$, $F_3 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_7$, $F_5 \rightarrow Z$

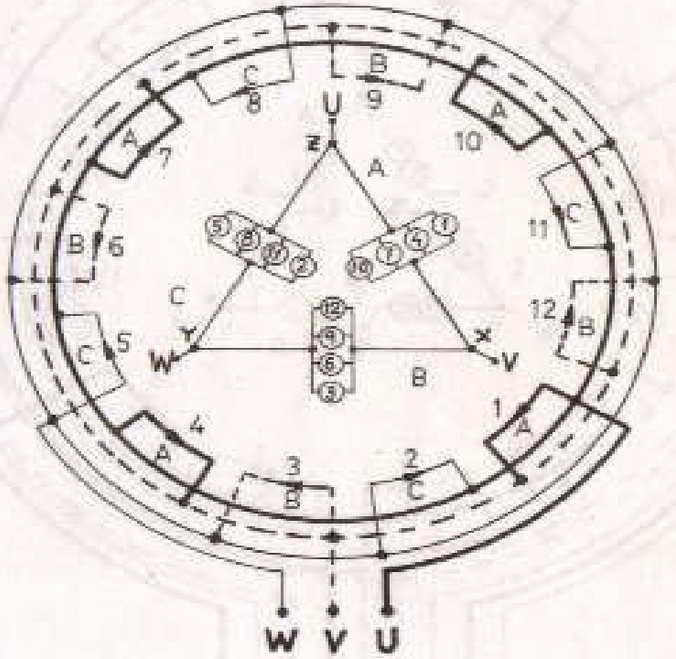


Conexión triángulo serie

2p=4. Polos alternados

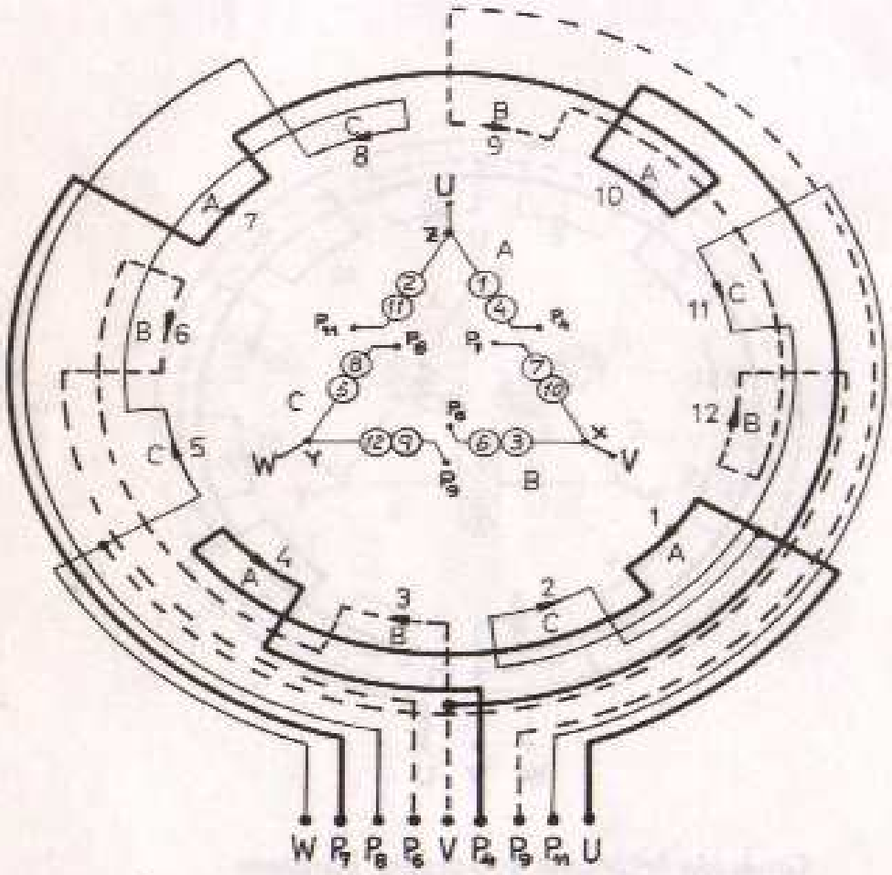


Conexión triángulo doble paralelo

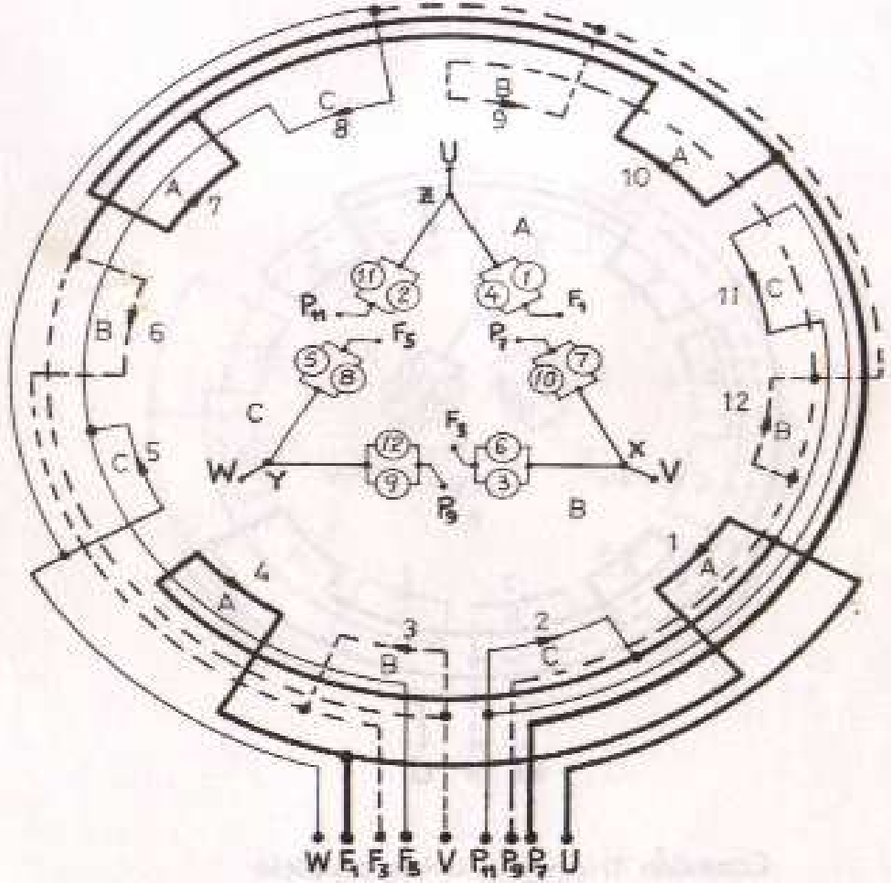


Conexión triángulo cuádruple paralelo

2p = 4. Polos alternados

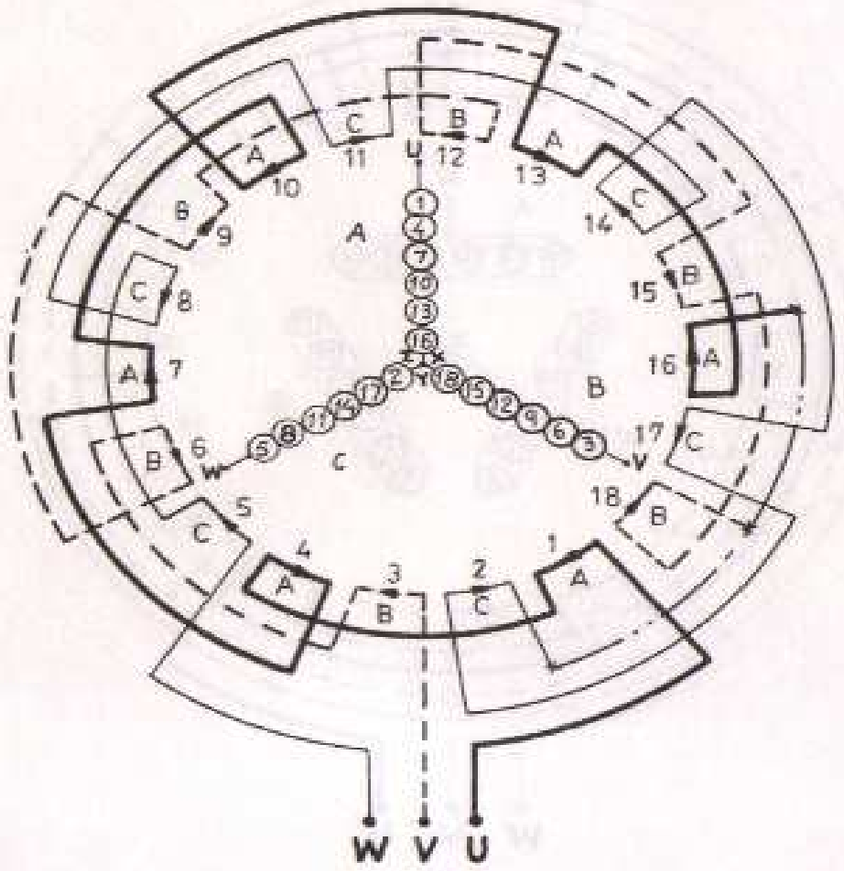


Conexión triángulo serie : $P_4 \rightarrow P_7$, $P_5 \rightarrow P_9$, $P_8 \rightarrow P_{11}$
Conexión triángulo doble paralelo : $U \rightarrow P_7$, $P_4 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_9$, $P_5 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{11}$, $P_8 \rightarrow Z$

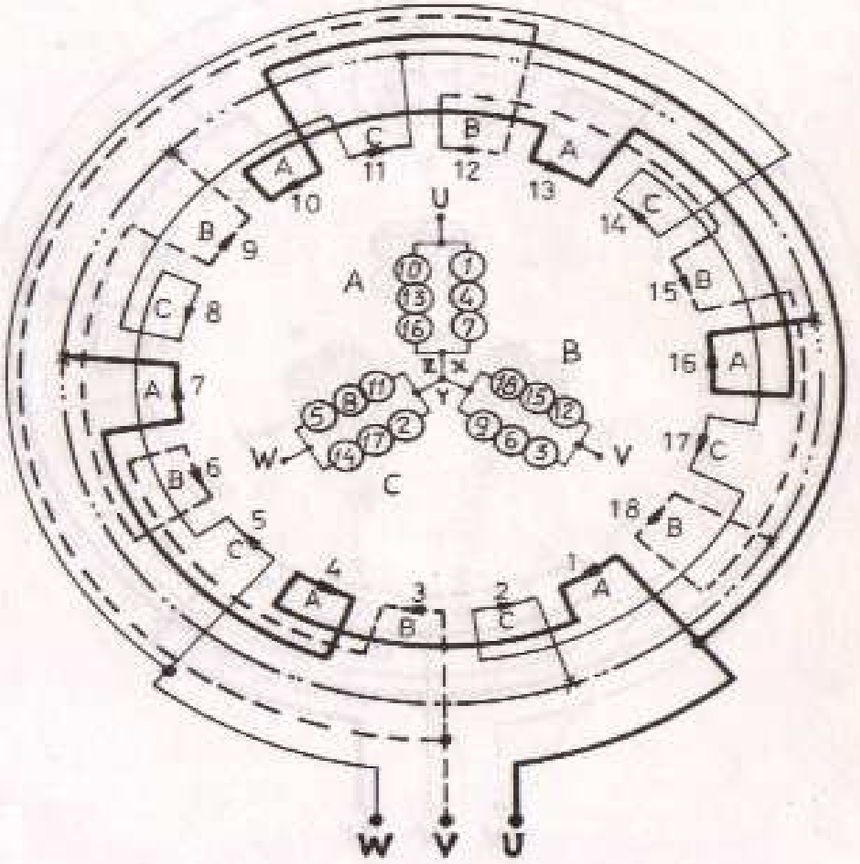


Conexión triángulo doble paralelo : $F_1 \rightarrow P_7$, $F_3 \rightarrow P_9$, $F_5 \rightarrow P_{11}$
Conexión triángulo cuádruple paralelo : $U \rightarrow P_7$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_9$, $F_3 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{11}$, $F_5 \rightarrow Z$

2p = 6. Polos alternados

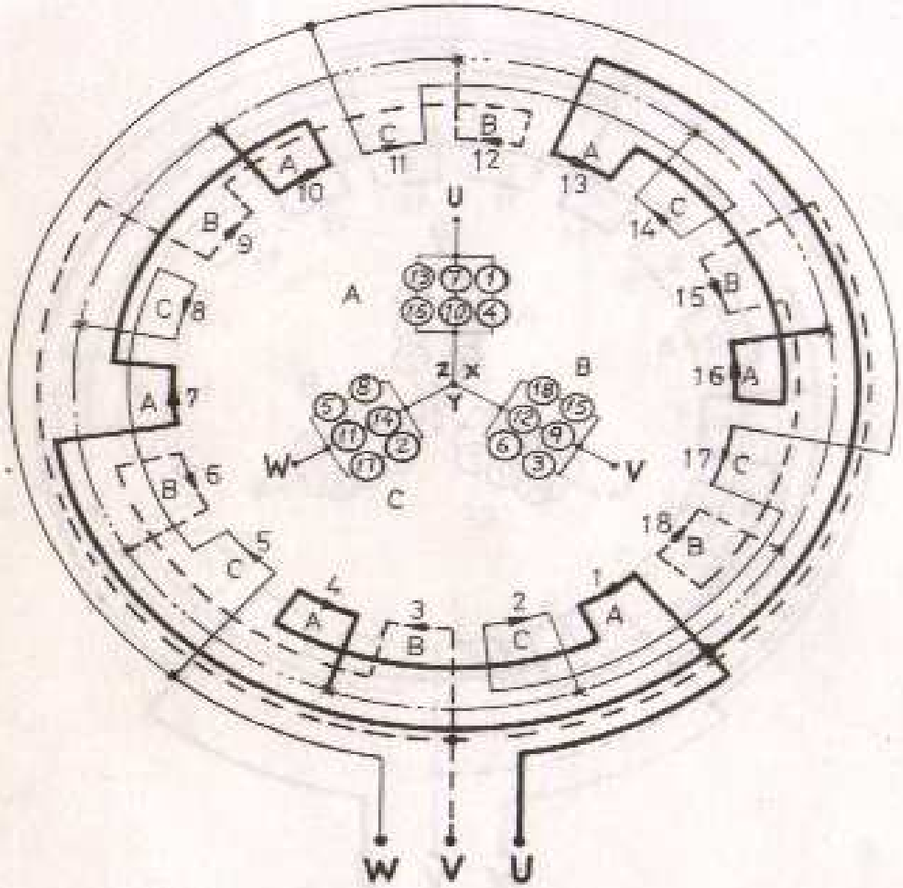


Conexión estrella serie

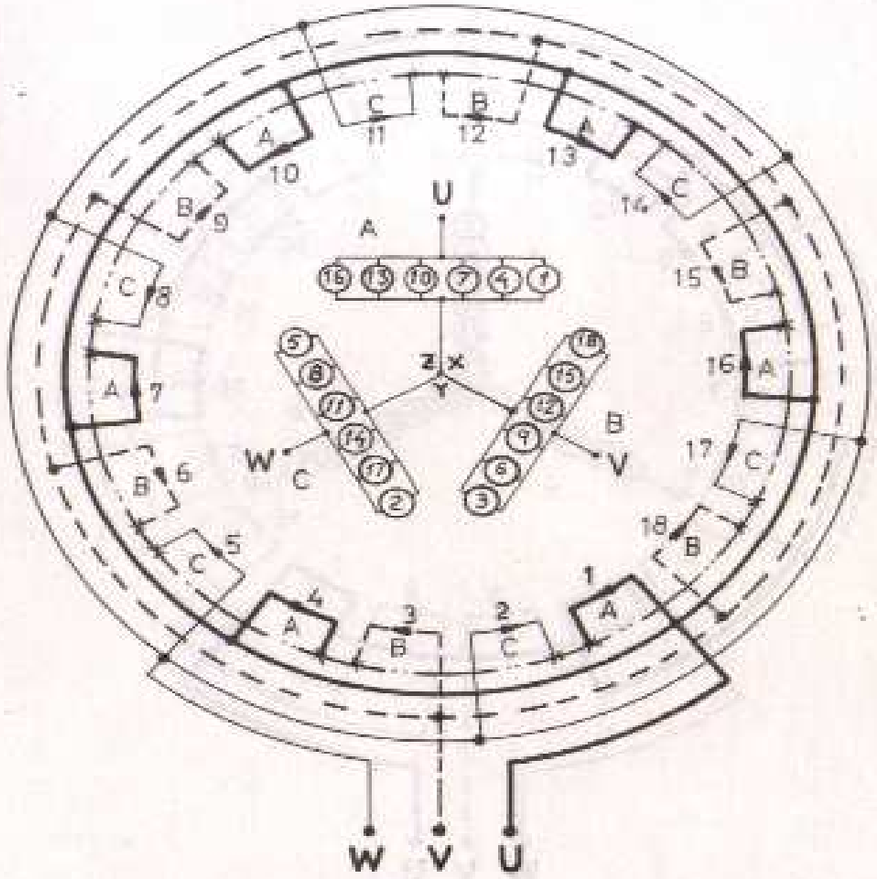


Conexión estrella doble paralelo

2p=6. Polos alternados

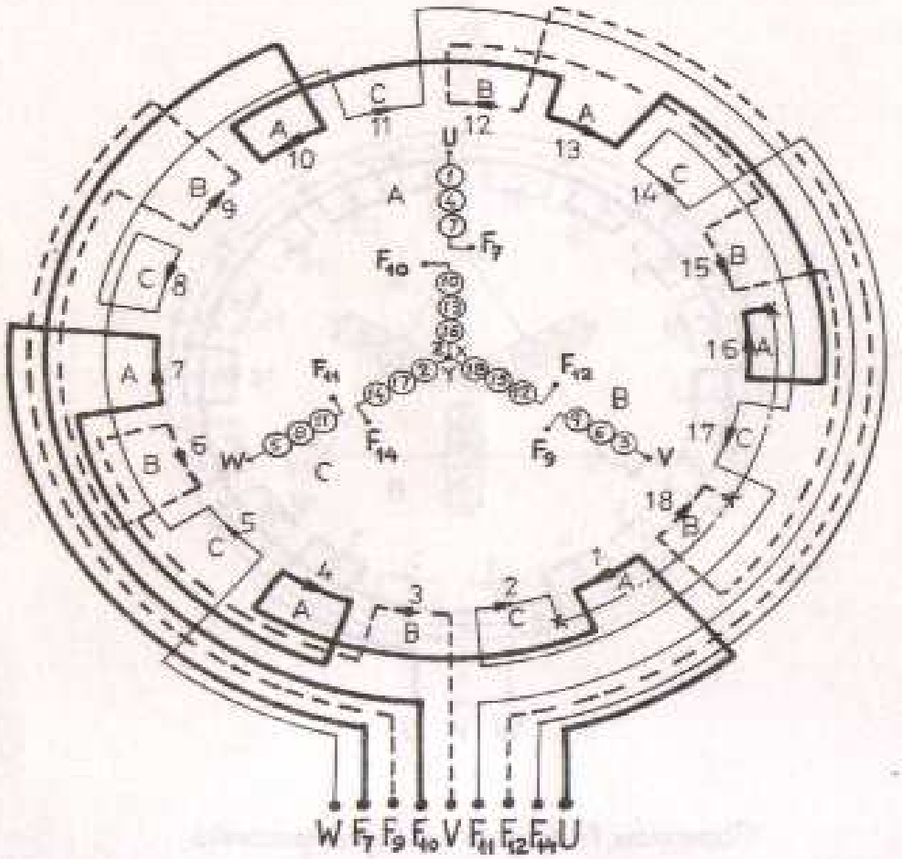


Conexión estrella triple paralelo

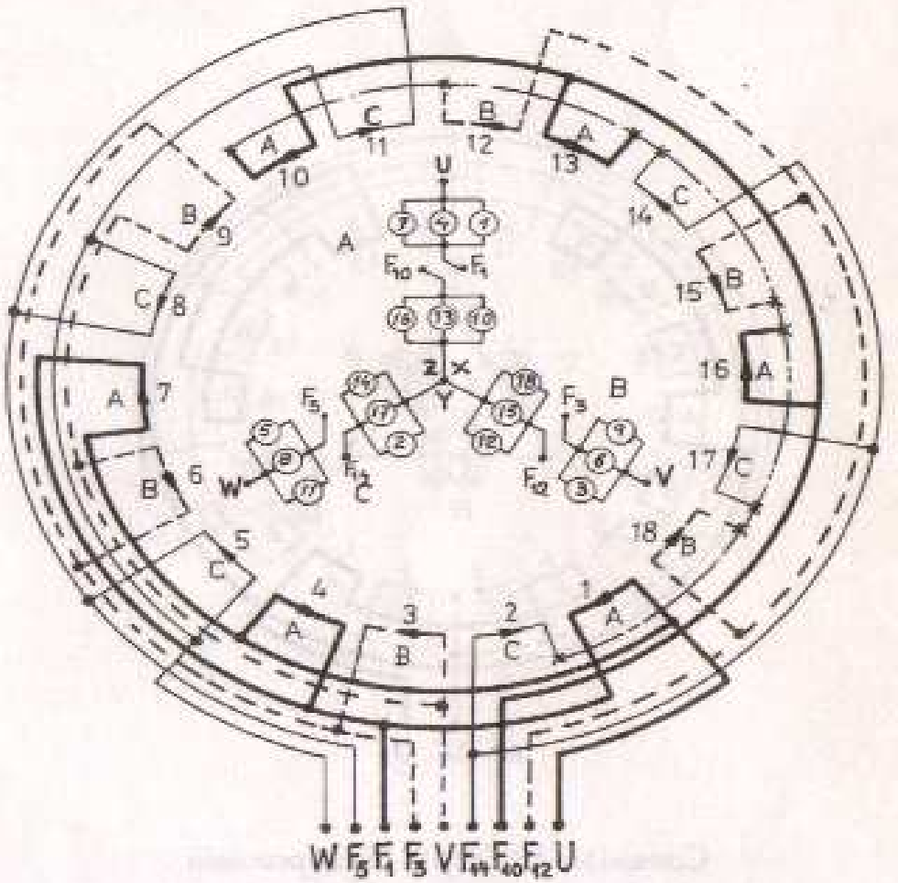


Conexión estrella séxtuple paralelo

2p = 6. Polos alternados

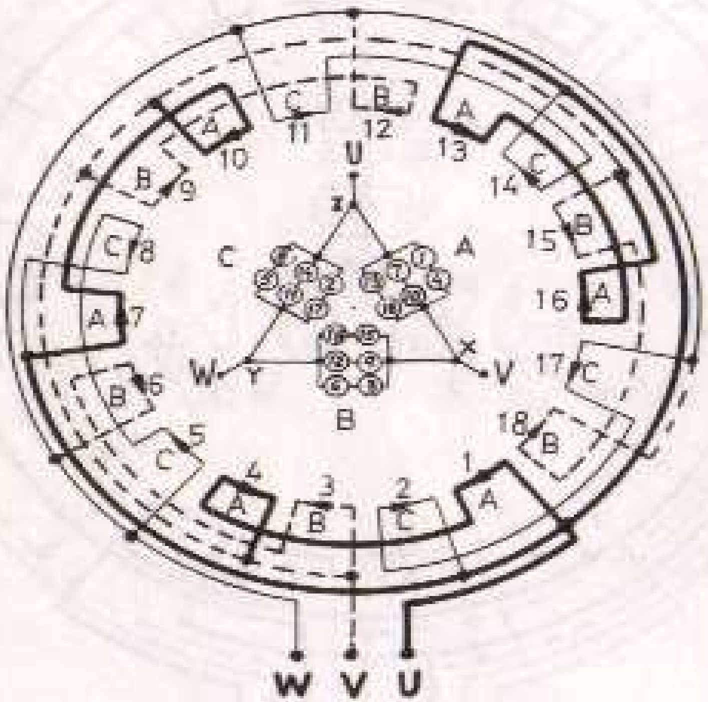


Conexión estrella serie: $F_7 \rightarrow F_{10}$, $F_9 \rightarrow F_{12}$, $F_{11} \rightarrow F_{14}$
Conexión estrella doble paralelo: $U \rightarrow F_{10}$, $F_7 \rightarrow X$
$V \rightarrow F_{12}$, $F_9 \rightarrow Y$
$W \rightarrow F_{14}$, $F_{11} \rightarrow Z$

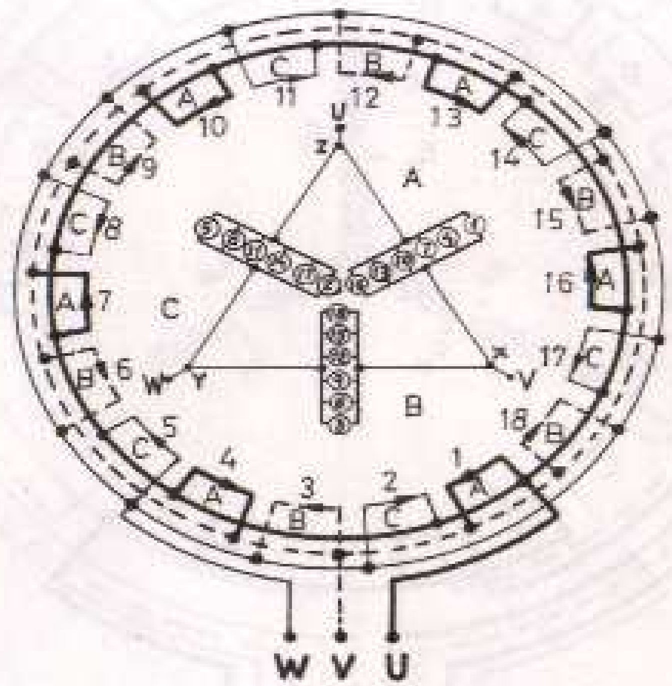


Conexión estrella triple paralelo: $F_1 \rightarrow F_{10}$, $F_3 \rightarrow F_{12}$, $F_5 \rightarrow F_{14}$
Conexión estrella séxtuple paralelo: $U \rightarrow F_{10}$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow F_{12}$, $F_3 \rightarrow Y$
$W \rightarrow F_{14}$, $F_5 \rightarrow Z$

2p=6. Polos alternados

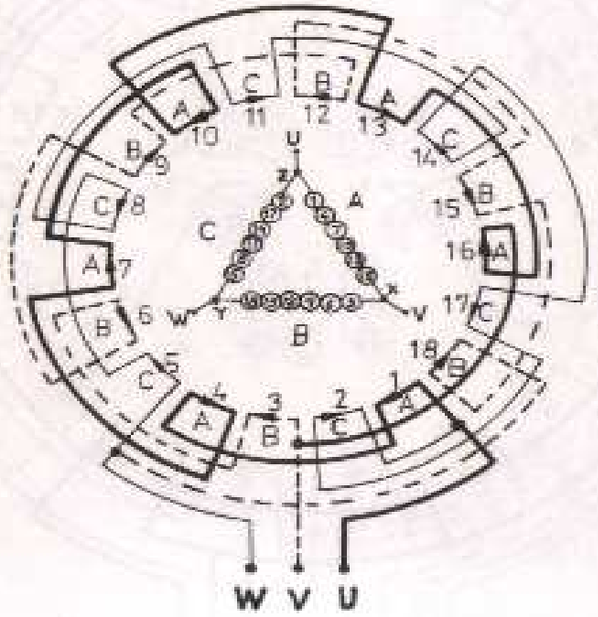


Conexión triángulo triple paralelo

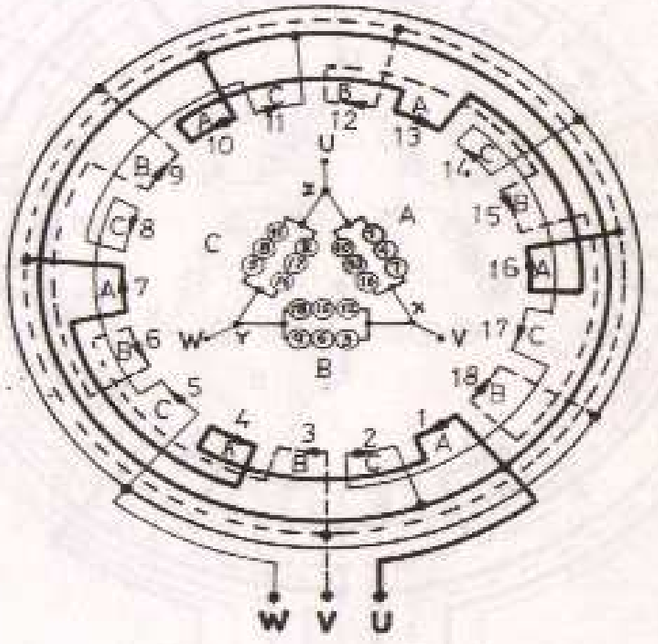


Conexión triángulo séxtuple paralelo

2p=6. Polos alternados

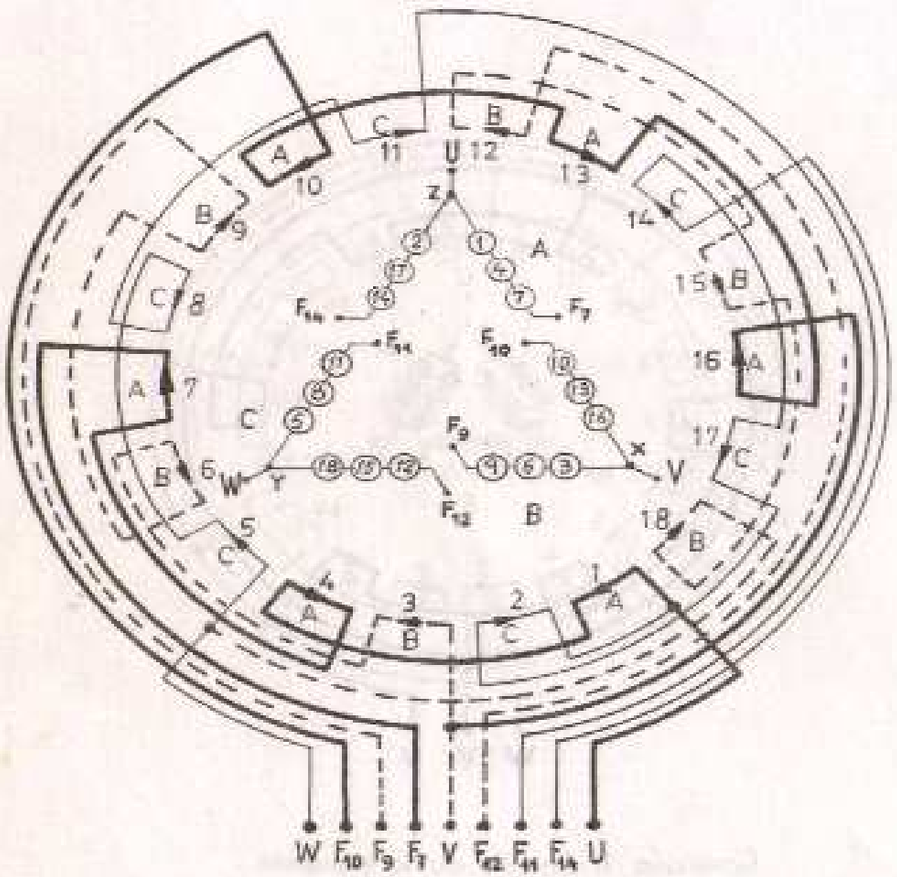


Conexión triángulo serie

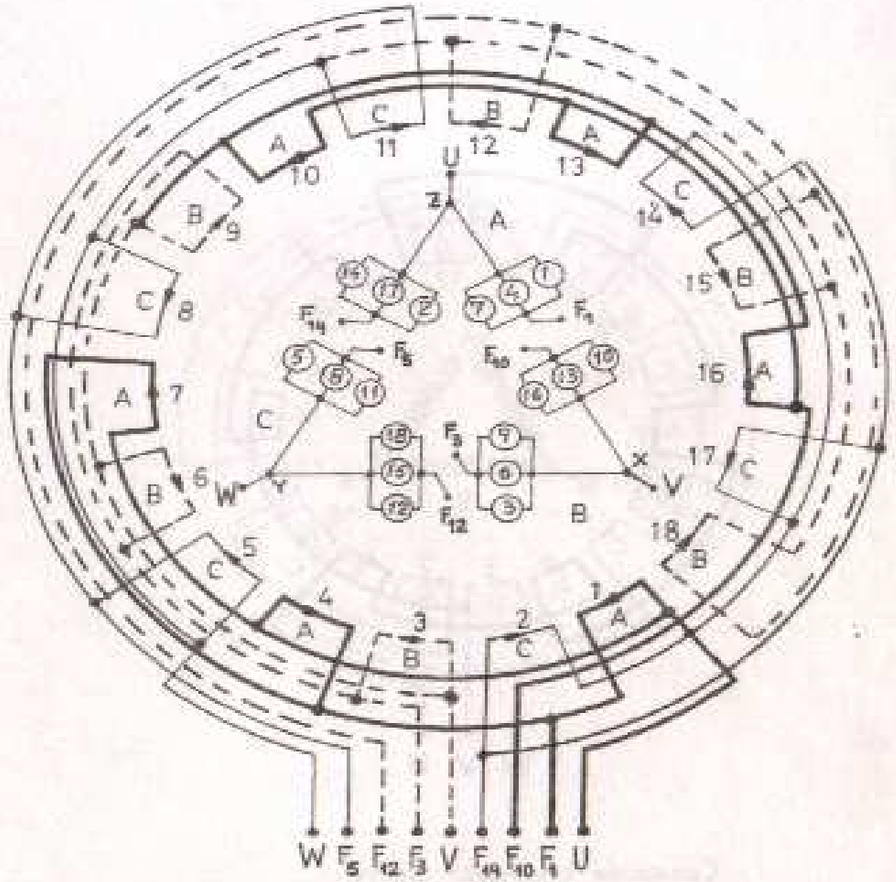


Conexión triángulo doble paralelo

2p=6. Polos alternados

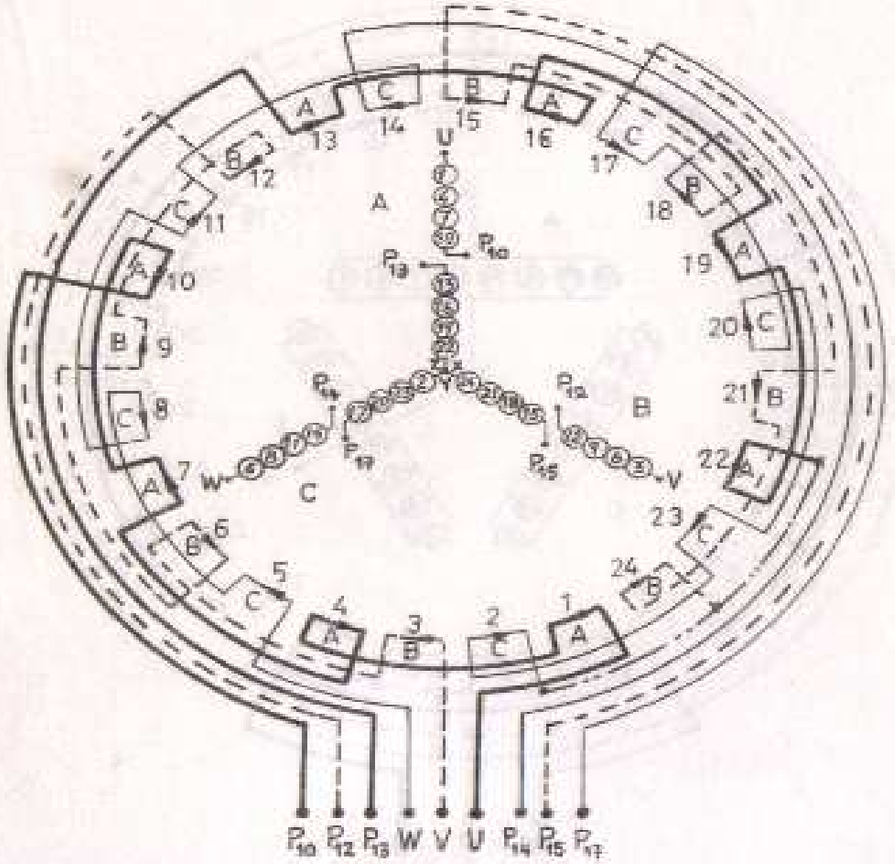


Conexión triángulo serie: $F_7 \rightarrow F_{10}$, $F_9 \rightarrow F_{12}$, $F_{11} \rightarrow F_{14}$
Conexión triángulo doble paralelo: $U \rightarrow F_{10}$, $F_7 \rightarrow X$
$V \rightarrow F_{12}$, $F_9 \rightarrow Y$
$W \rightarrow F_{14}$, $F_{11} \rightarrow Z$

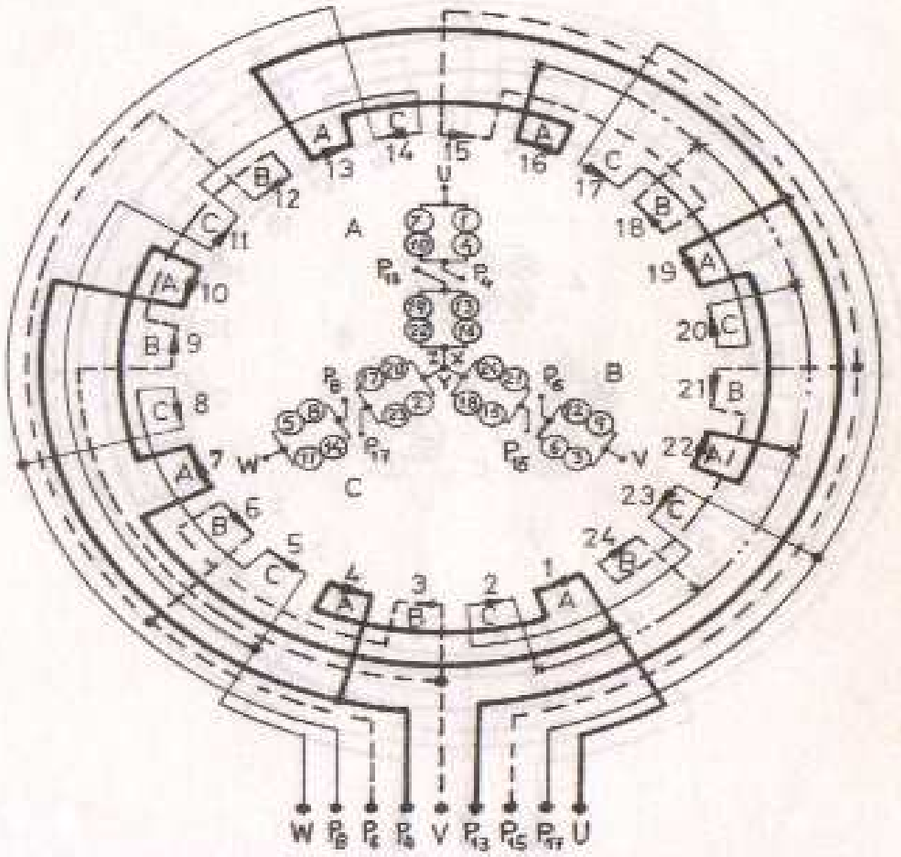


Conexión triángulo triple paralelo: $F_1 \rightarrow F_{10}$, $F_3 \rightarrow F_{12}$, $F_5 \rightarrow F_{14}$
Conexión triángulo sextuple paralelo: $U \rightarrow F_{10}$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow F_{12}$, $F_3 \rightarrow Y$
$W \rightarrow F_{14}$, $F_5 \rightarrow Z$

2p = 8. Polos alternados

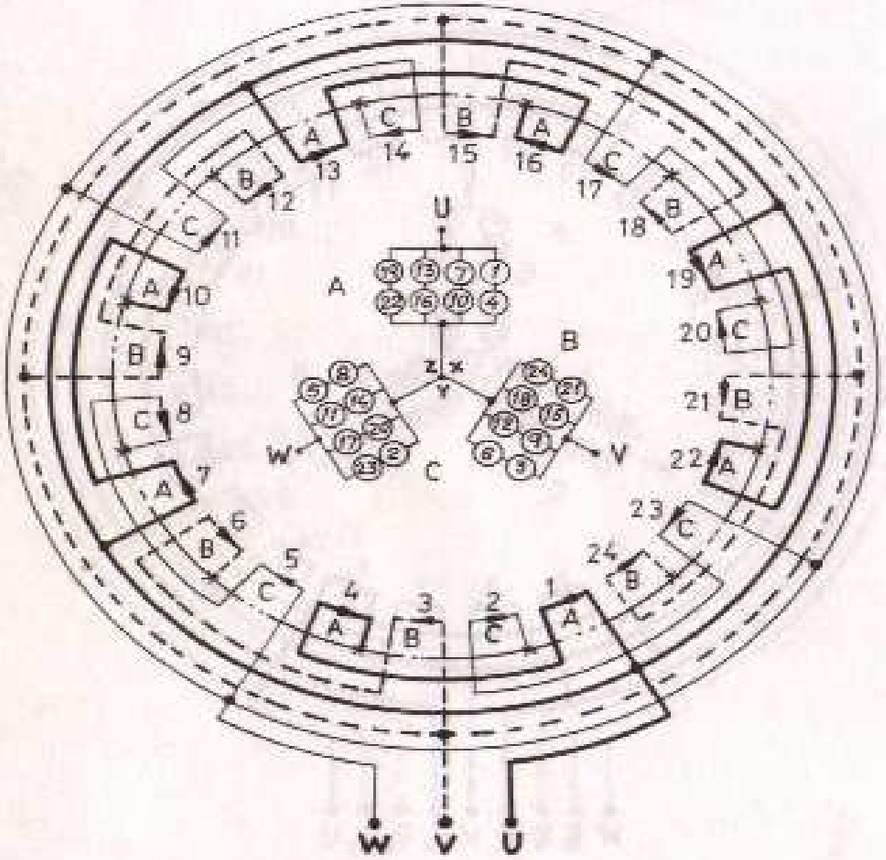


Conexión estrella serie: $P_{10} \rightarrow P_{13}$, $P_{12} \rightarrow P_{15}$, $P_{14} \rightarrow P_{17}$
Conexión estrella doble paralelo: $U \rightarrow P_{13}$, $P_{10} \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{15}$, $P_{12} \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{17}$, $P_{14} \rightarrow Z$

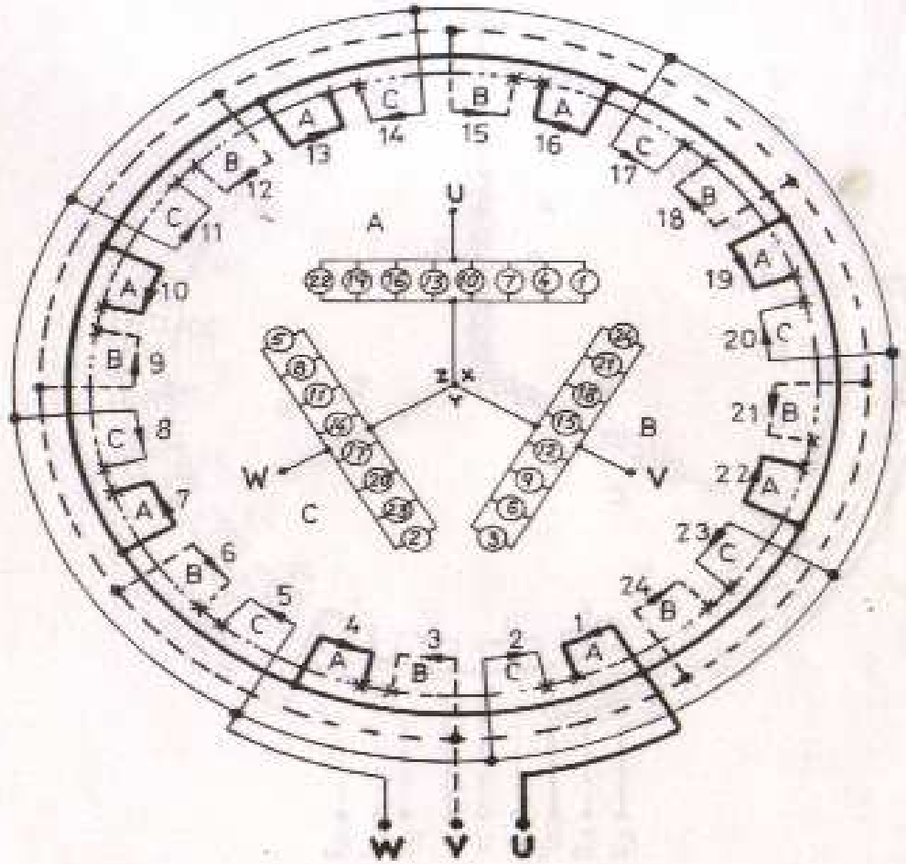


Conexión estrella doble paralelo: $P_4 \rightarrow P_{13}$, $P_6 \rightarrow P_{15}$, $P_8 \rightarrow P_{17}$
Conexión estrella cuádruple paralelo: $U \rightarrow P_{13}$, $P_4 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{15}$, $P_6 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{17}$, $P_8 \rightarrow Z$

2p = 8. Polos alternados



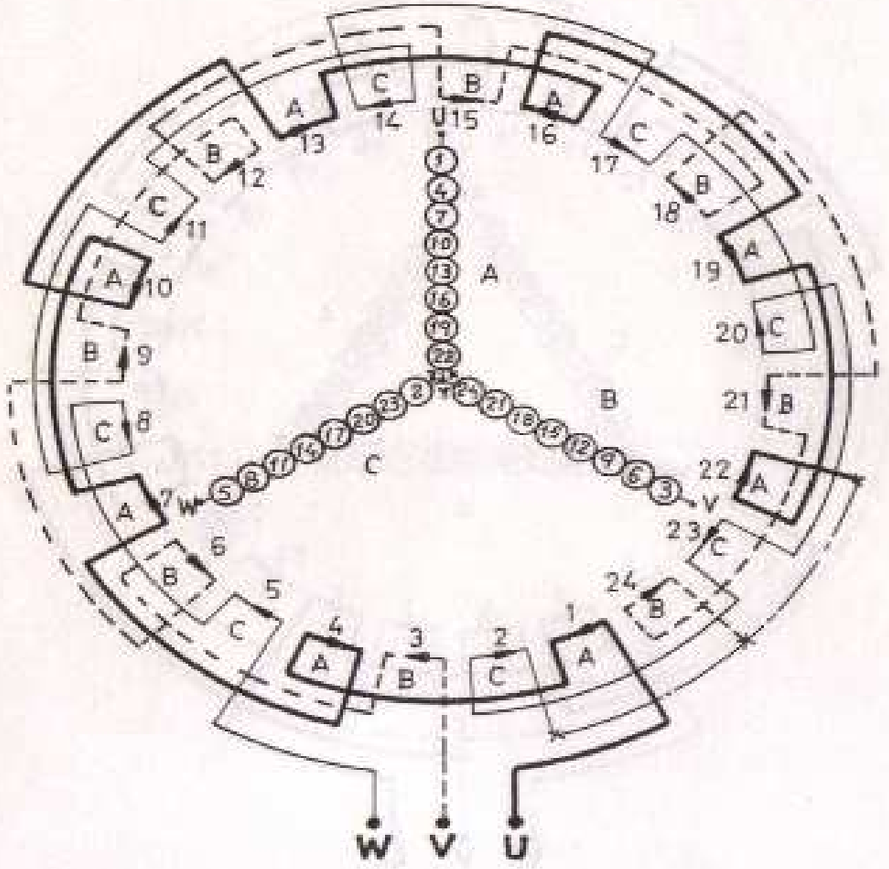
Conexión estrella cuádruple paralelo



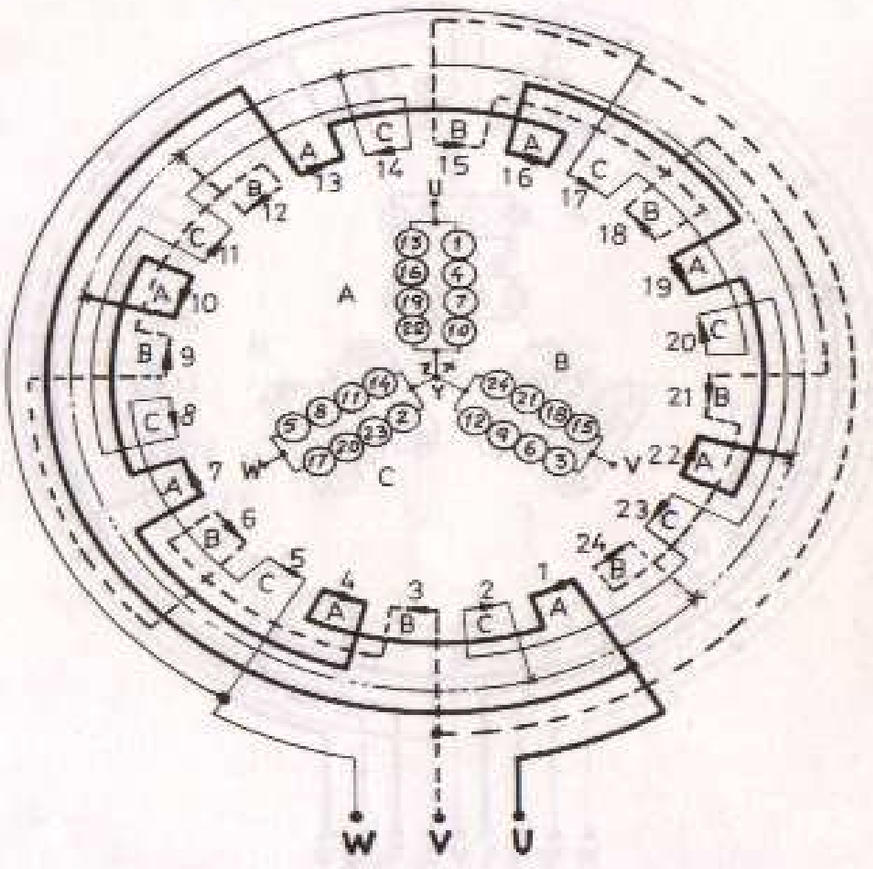
Conexión estrella óctuple paralelo

"Sofia-Randstrass"

2p=8. Polos alternados

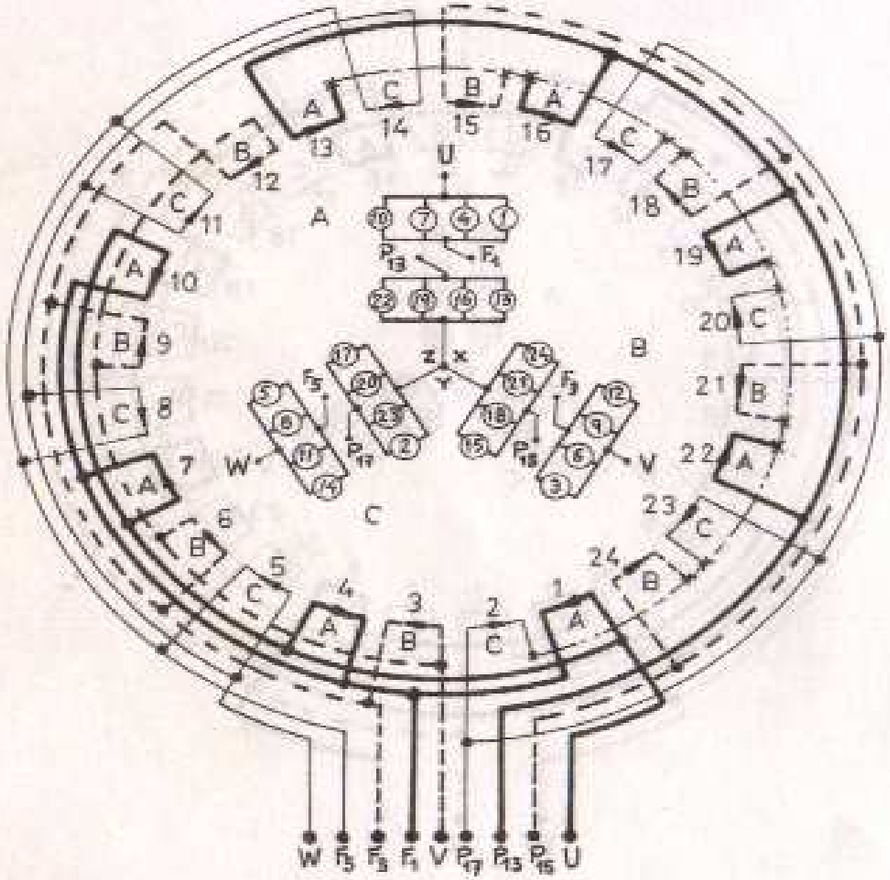


Conexión estrella serie

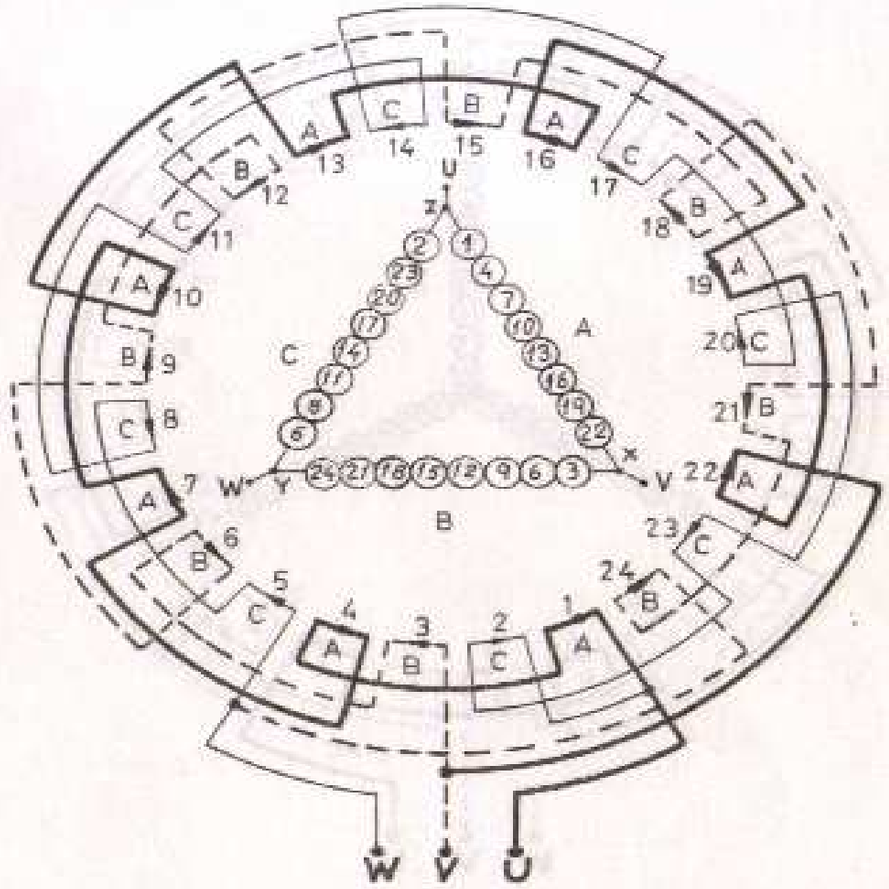


Conexión estrella doble paralelo

2p = 8 . Polos alternados

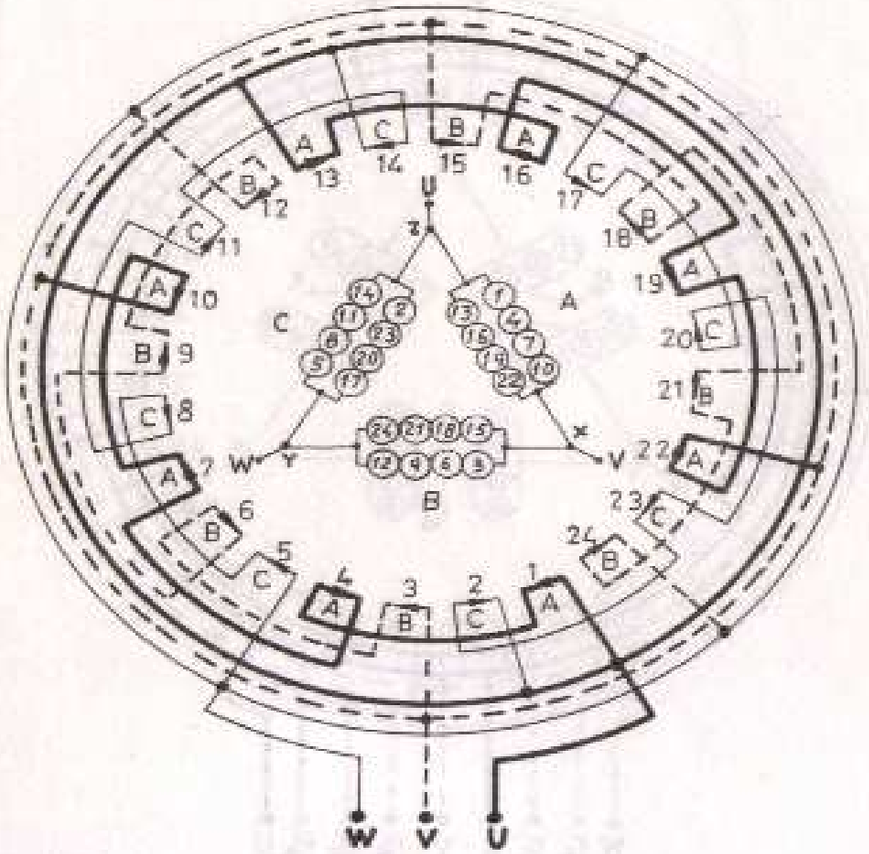


Conexión estrella cuádruple paralelo: $F_1 \rightarrow P_{13}$, $F_3 \rightarrow P_{15}$, $F_5 \rightarrow P_{17}$
Conexión estrella óctuple paralelo: $U \rightarrow P_{13}$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{15}$, $F_3 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{17}$, $F_5 \rightarrow Z$

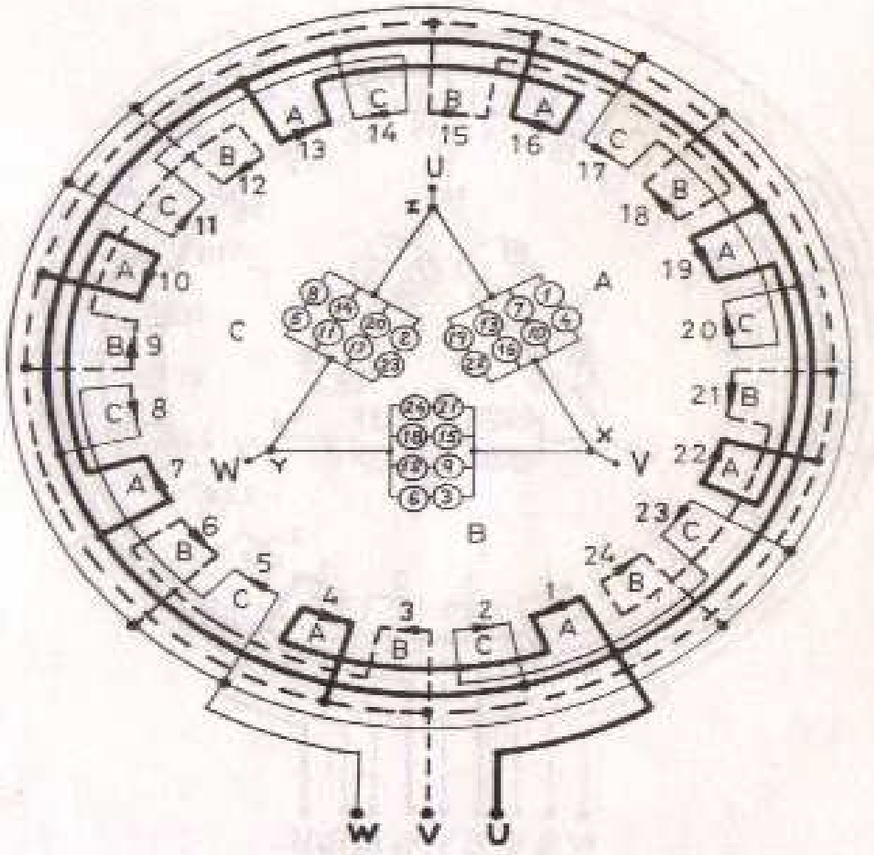


Conexión triángulo serie

2p = 8. Polos alternados

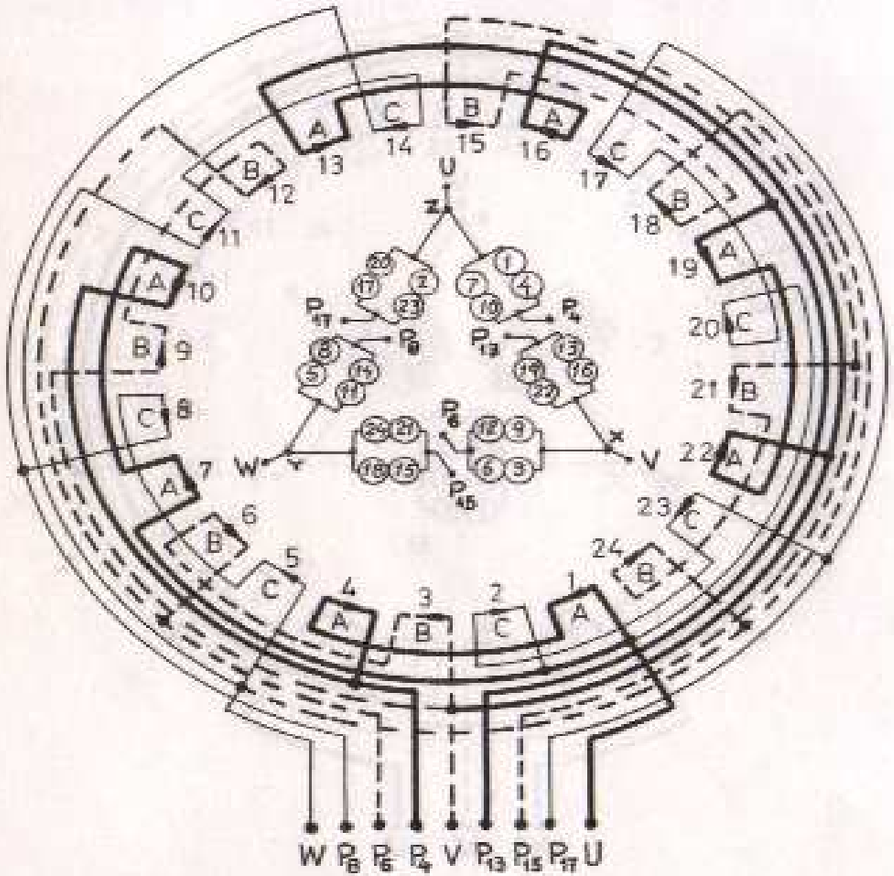


Conexión triángulo doble paralelo

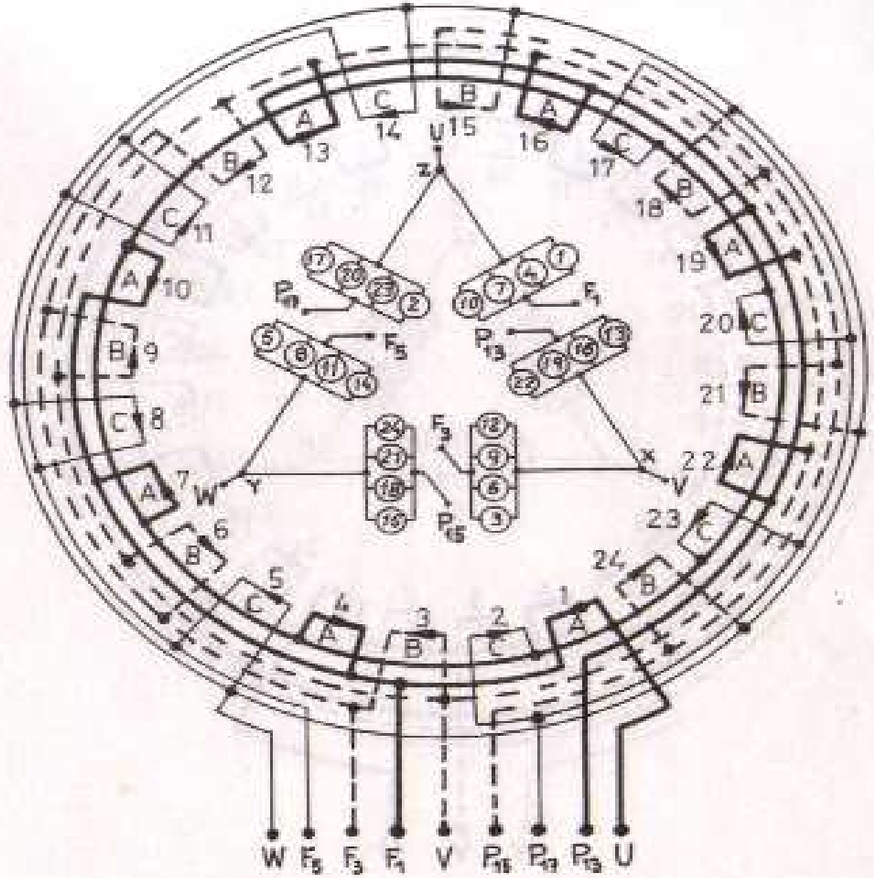


Conexión triángulo cuádruple paralelo

2p = 8. Polos alternados

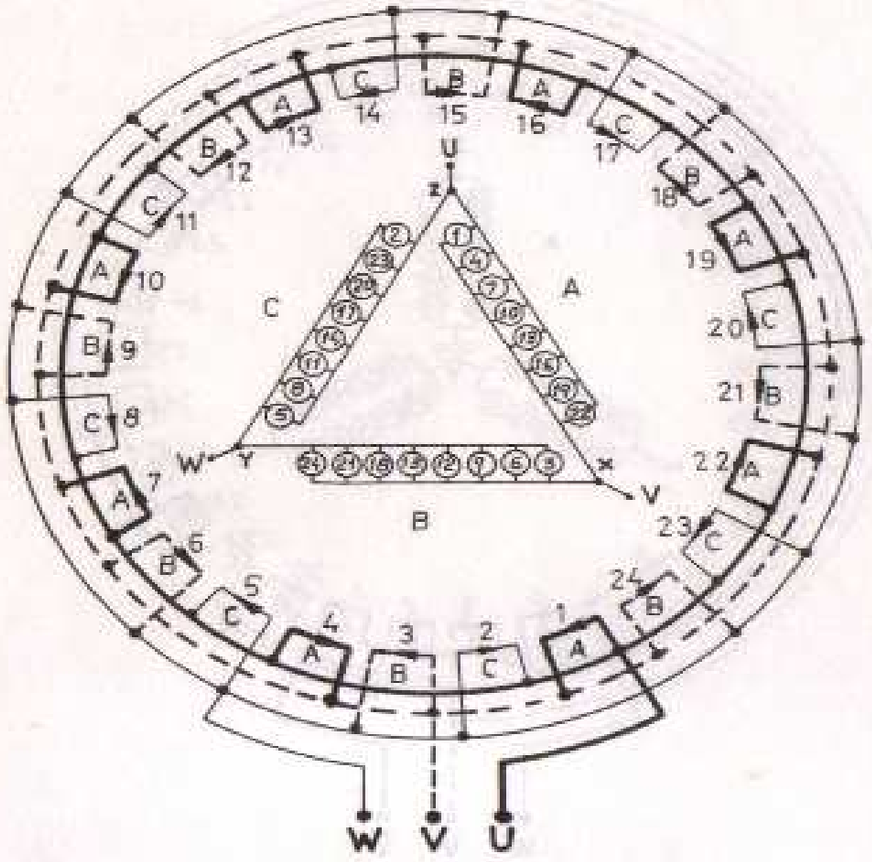


Conexión triángulo doble paralelo: $P_4 \rightarrow P_{13}$, $P_6 \rightarrow P_{15}$, $P_8 \rightarrow P_{17}$
Conexión triángulo cuádruple paralelo: $U \rightarrow P_{13}$, $P_4 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{15}$, $P_6 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{17}$, $P_8 \rightarrow Z$

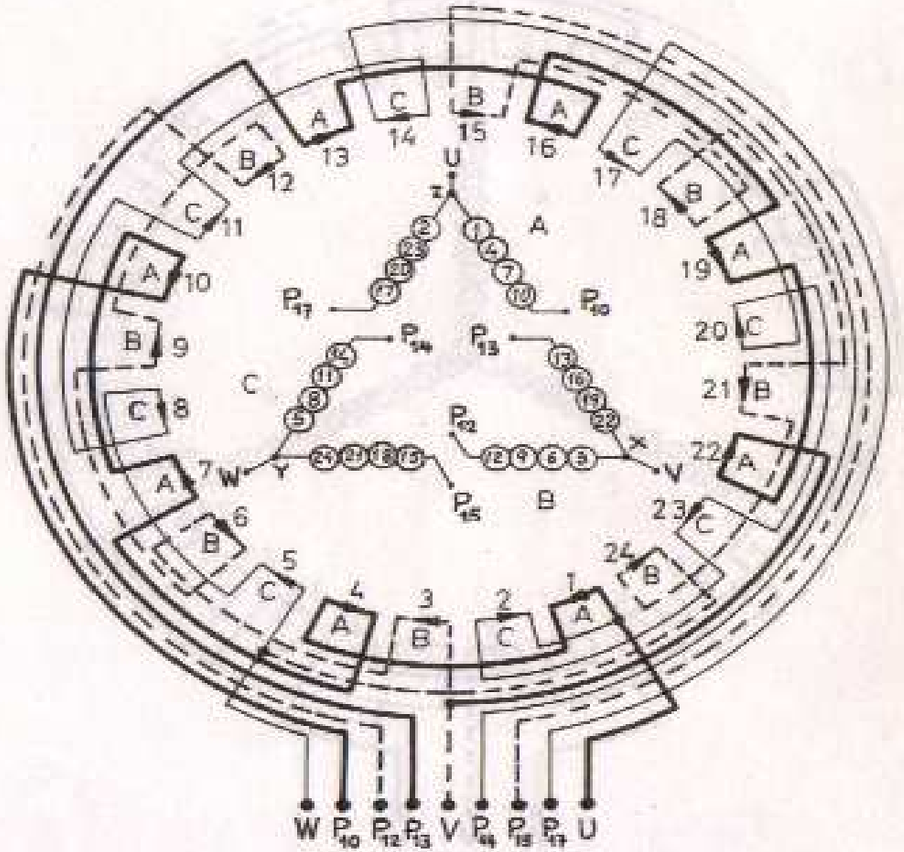


Conexión triángulo cuádruple paralelo: $F_1 \rightarrow P_{13}$, $F_3 \rightarrow P_{15}$, $F_5 \rightarrow P_{17}$
Conexión triángulo octuple paralelo: $U \rightarrow P_{13}$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{15}$, $F_3 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{17}$, $F_5 \rightarrow Z$

2p = 8. Polos alternados

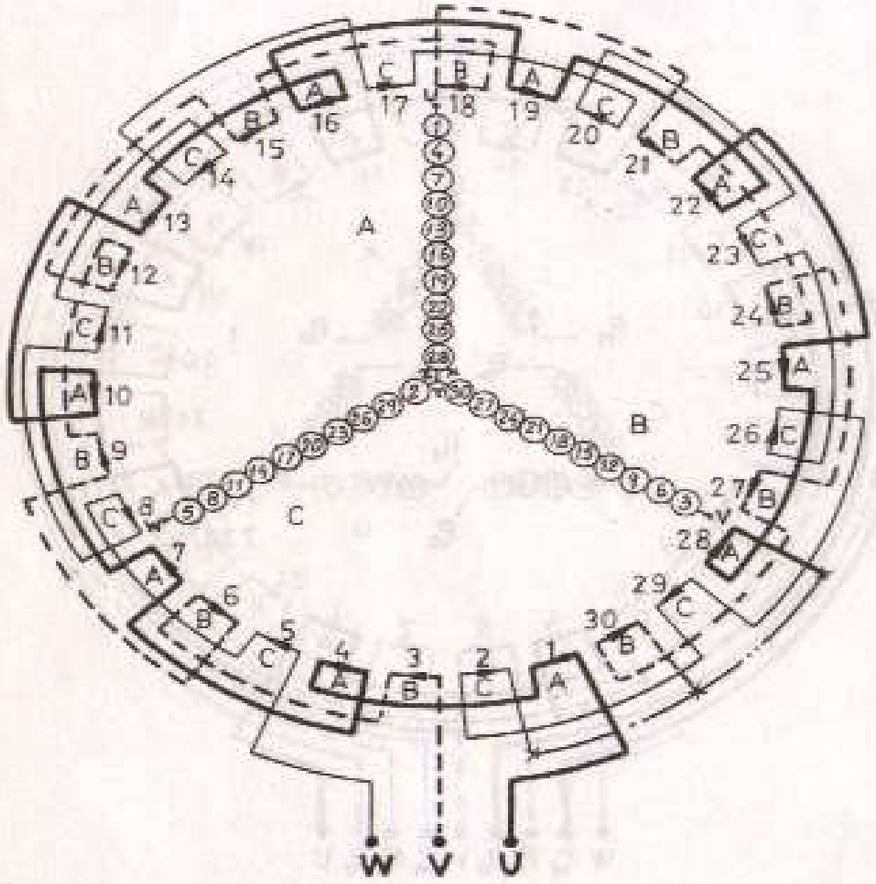


Conexión triángulo óctuple paralelo

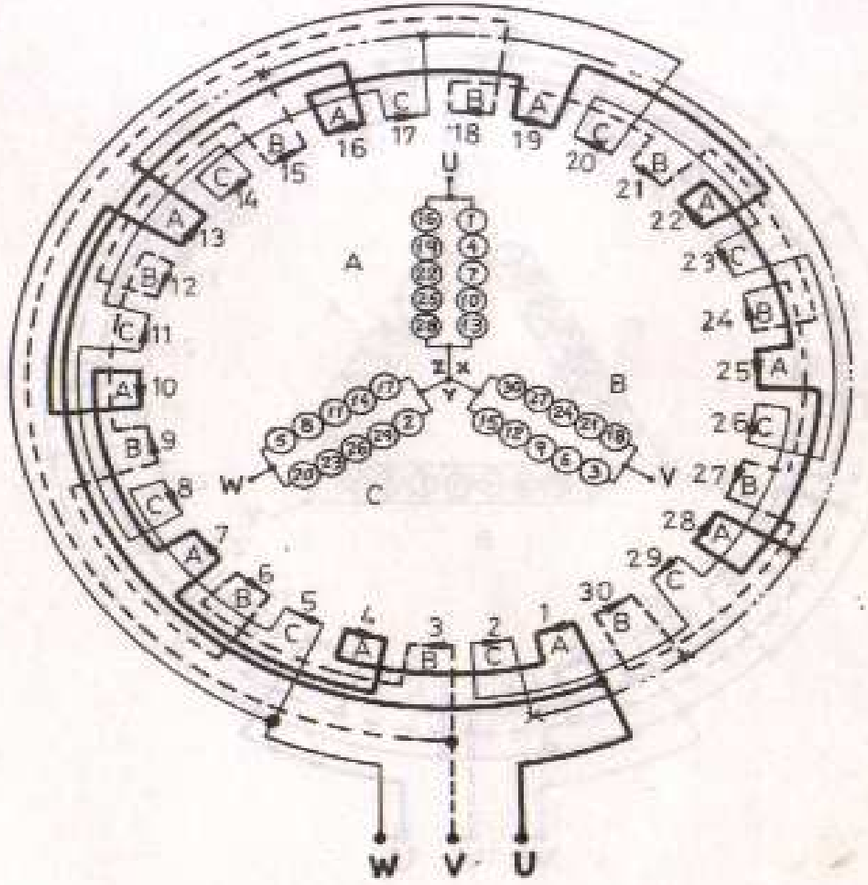


Conexión triángulo serie : $P_{10} \rightarrow P_{13}$, $P_{12} \rightarrow P_{15}$, $P_{14} \rightarrow P_{17}$
Conexión triángulo doble paralelo: $U \rightarrow P_{13}$, $P_{10} \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{15}$, $P_{12} \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{17}$, $P_{14} \rightarrow Z$

2p = 10. Polos alternados

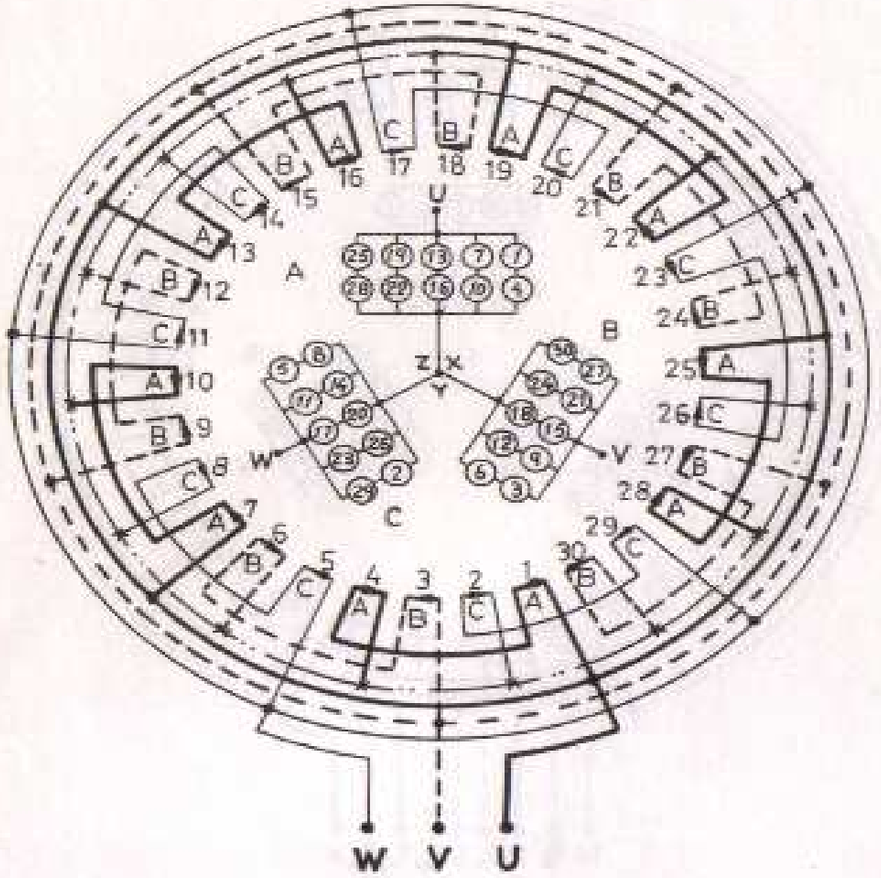


Conexión estrella serie

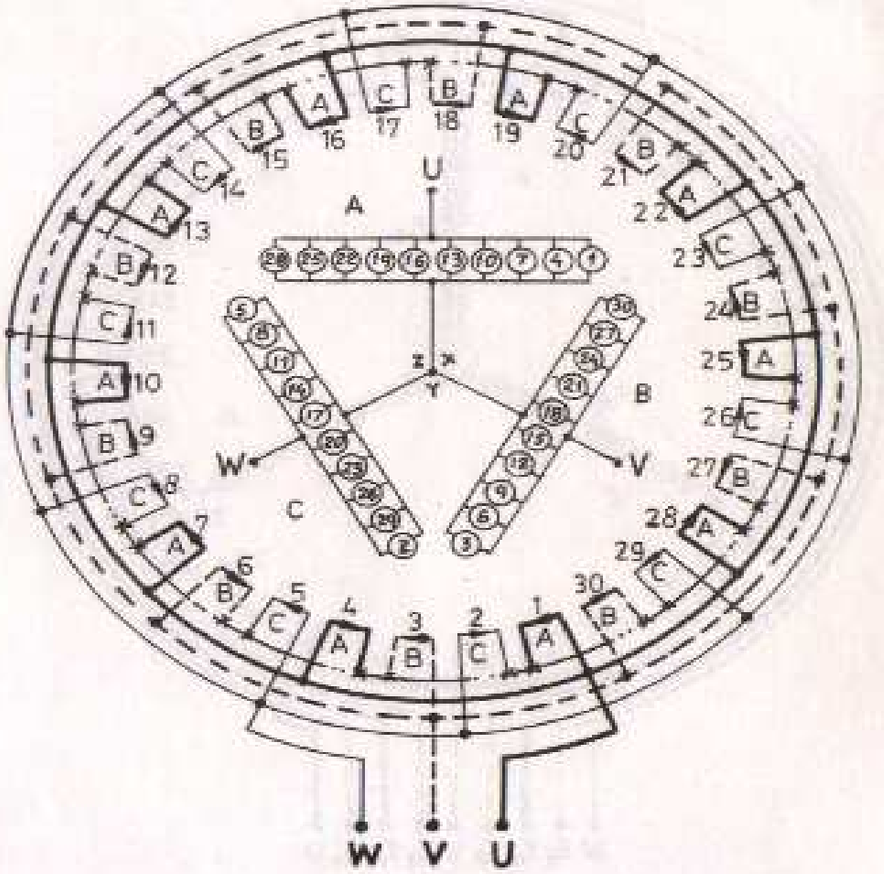


Conexión estrella doble paralelo

2p=10. Polos alternados

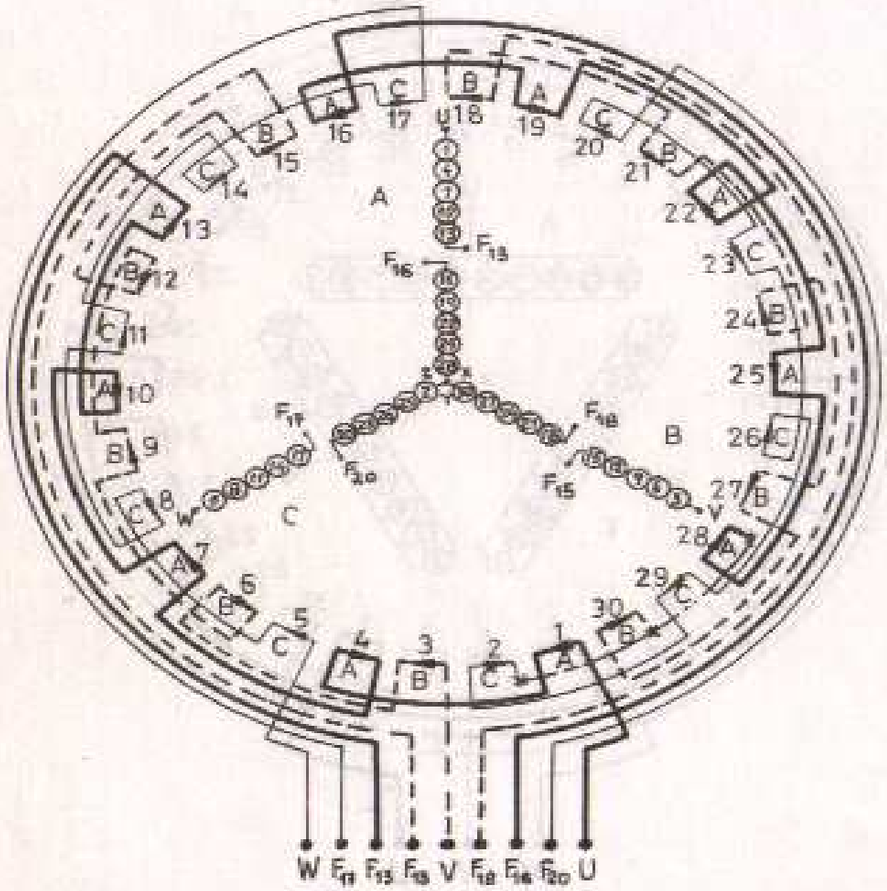


Conexión estrella quíntuple paralelo

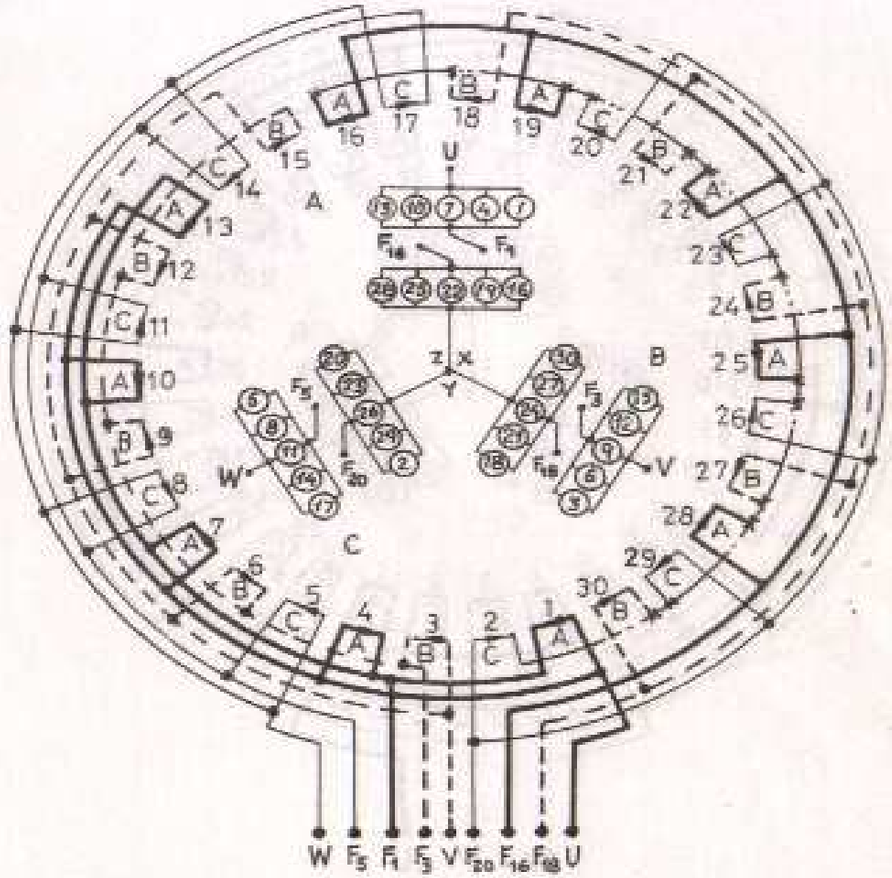


Conexión estrella décuple paralelo

2p=10. Polos alternados



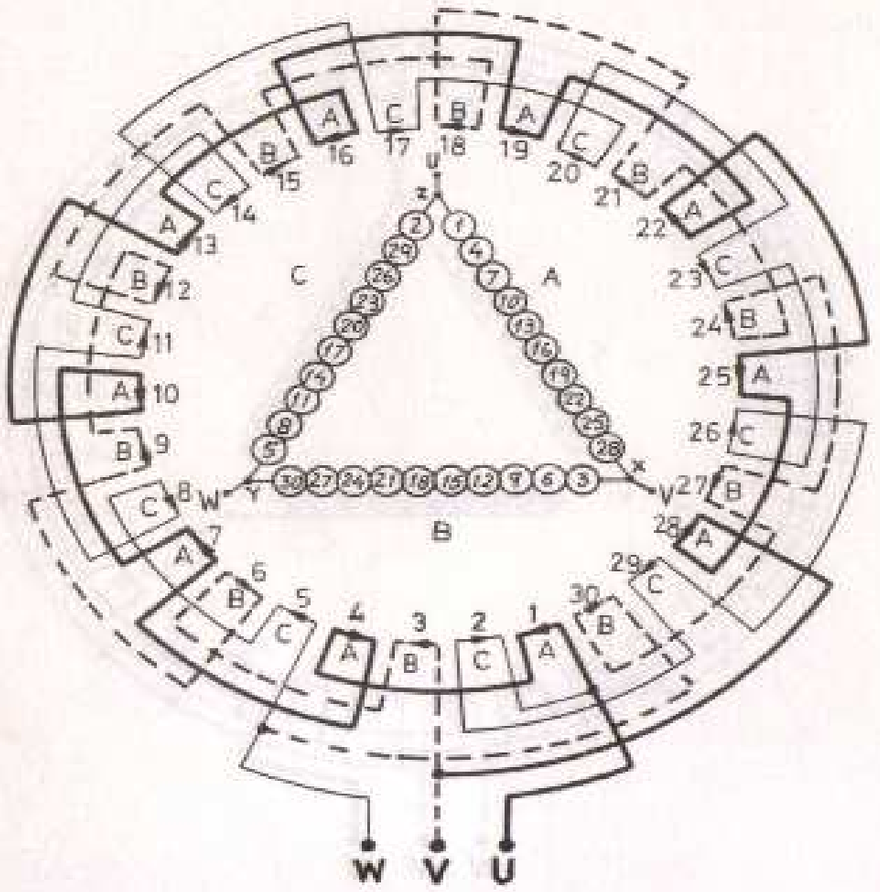
Conexión estrella serie: $F_{13} \rightarrow F_{16}$, $F_{15} \rightarrow F_{18}$, $F_{17} \rightarrow F_{20}$
Conexión estrella doble paralelo: $U \rightarrow F_{16}$, $F_{13} \rightarrow X$
$V \rightarrow F_{18}$, $F_{15} \rightarrow Y$
$W \rightarrow F_{20}$, $F_{17} \rightarrow Z$



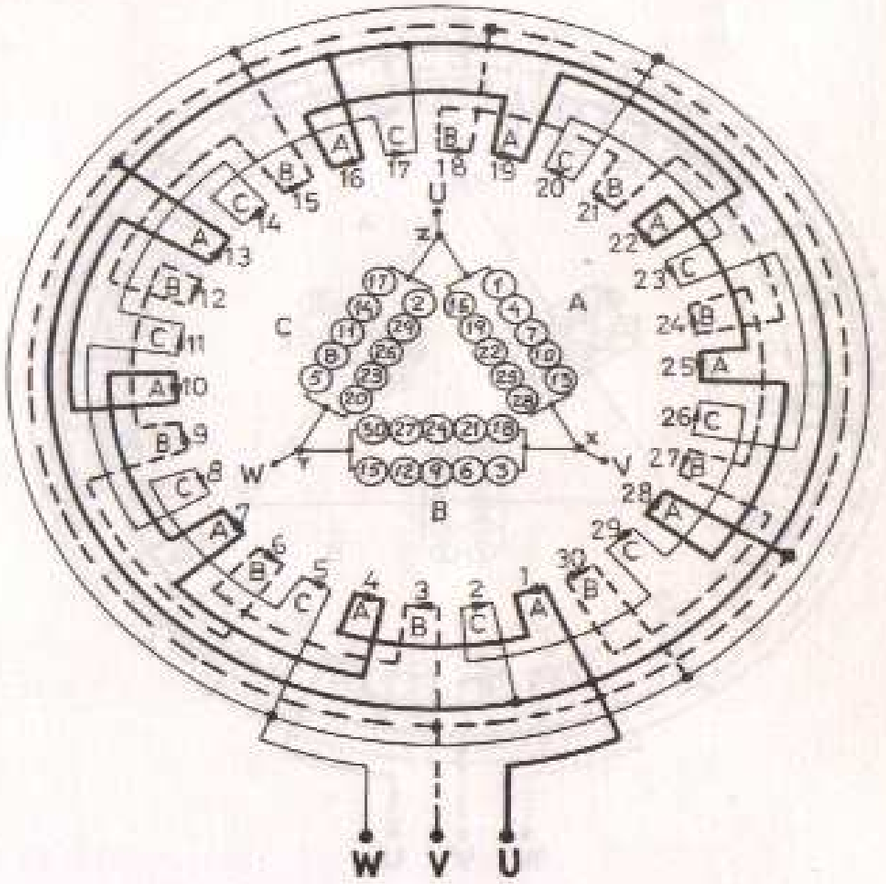
Conexión estrella quíntuple paralelo: $F_1 \rightarrow F_{16}$, $F_3 \rightarrow F_{18}$, $F_5 \rightarrow F_{20}$
Conexión estrella décuple paralelo: $U \rightarrow F_{16}$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow F_{18}$, $F_3 \rightarrow Y$
$W \rightarrow F_{20}$, $F_5 \rightarrow Z$

"Sepfo-Rundfunk"

2p=10. Polos alternados

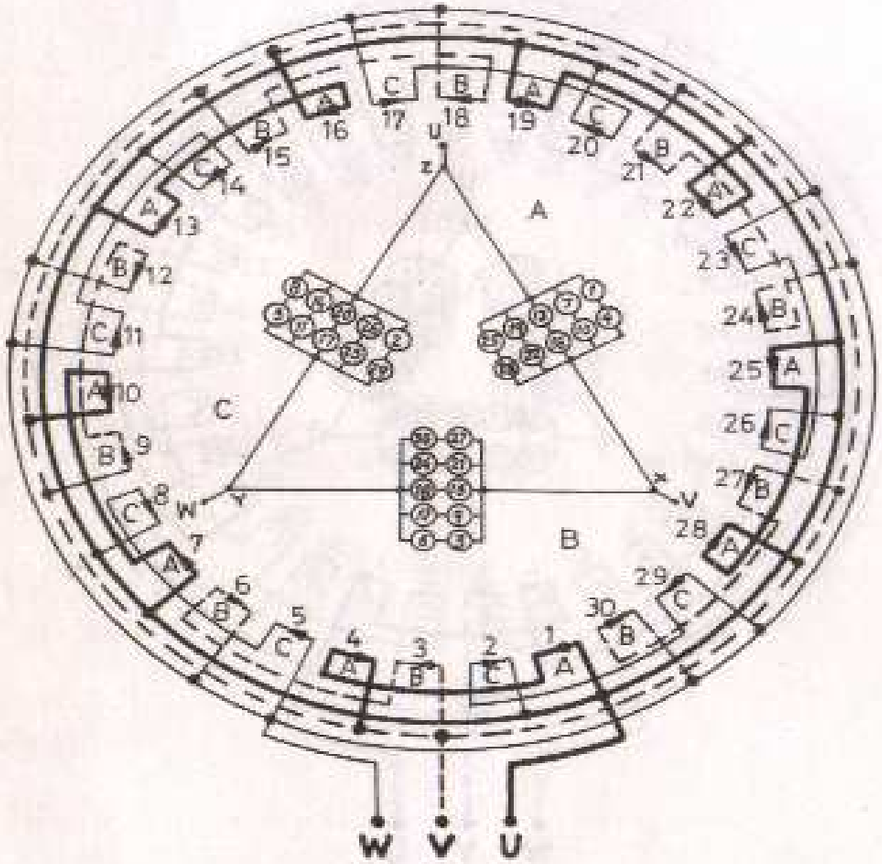


Conexión triángulo serie

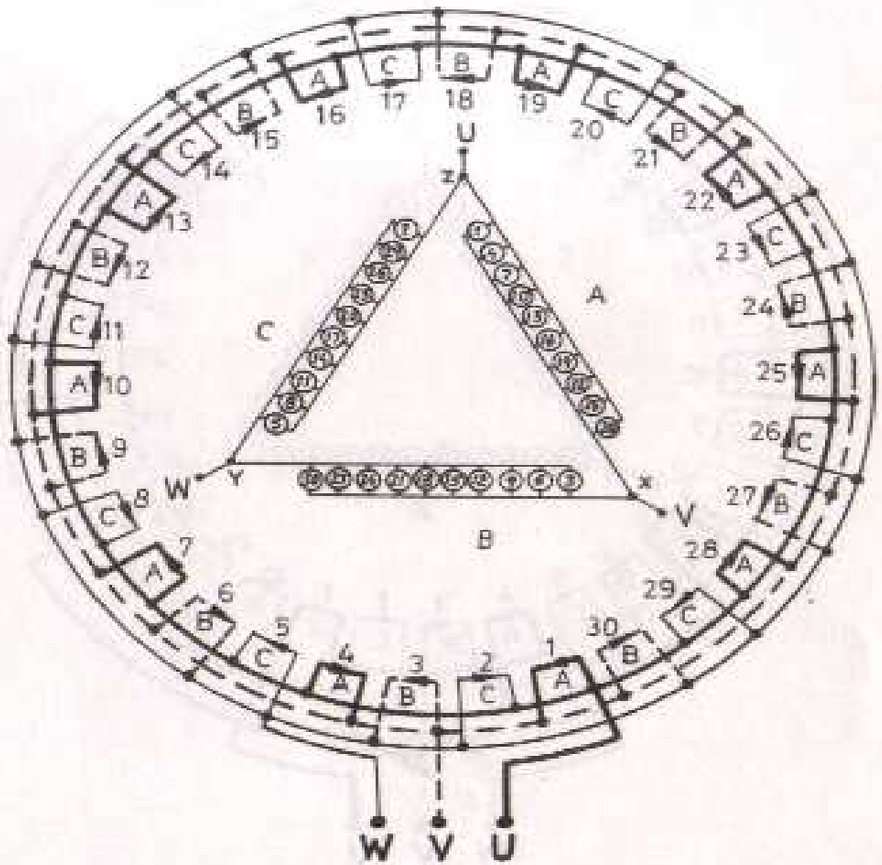


Conexión triángulo doble paralelo

2p = 10. Polos alternados

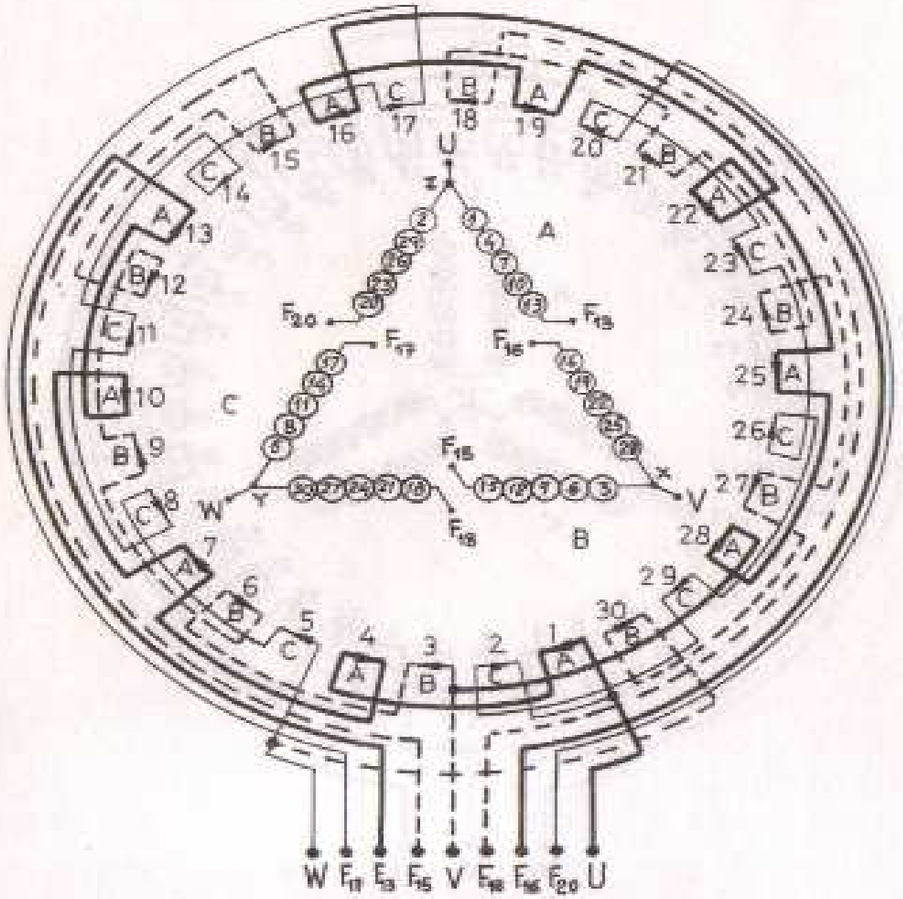


Conexión triángulo quíntuple paralelo

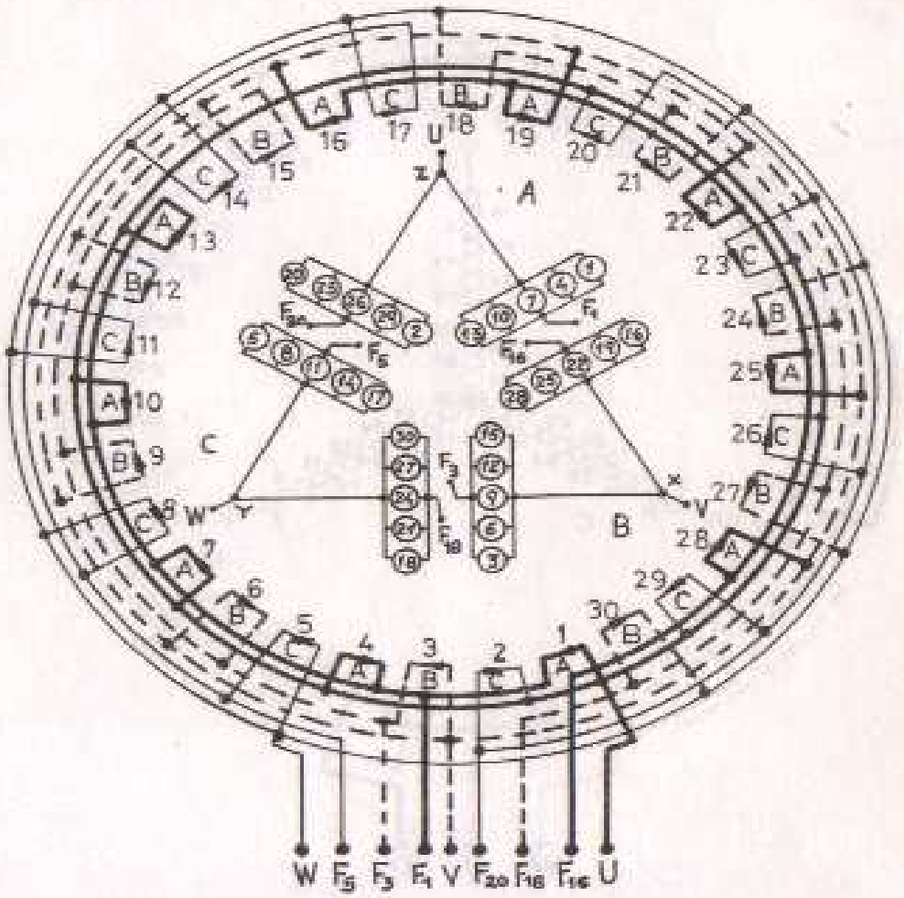


Conexión triángulo décuple paralelo

2p=10. Polos alternados

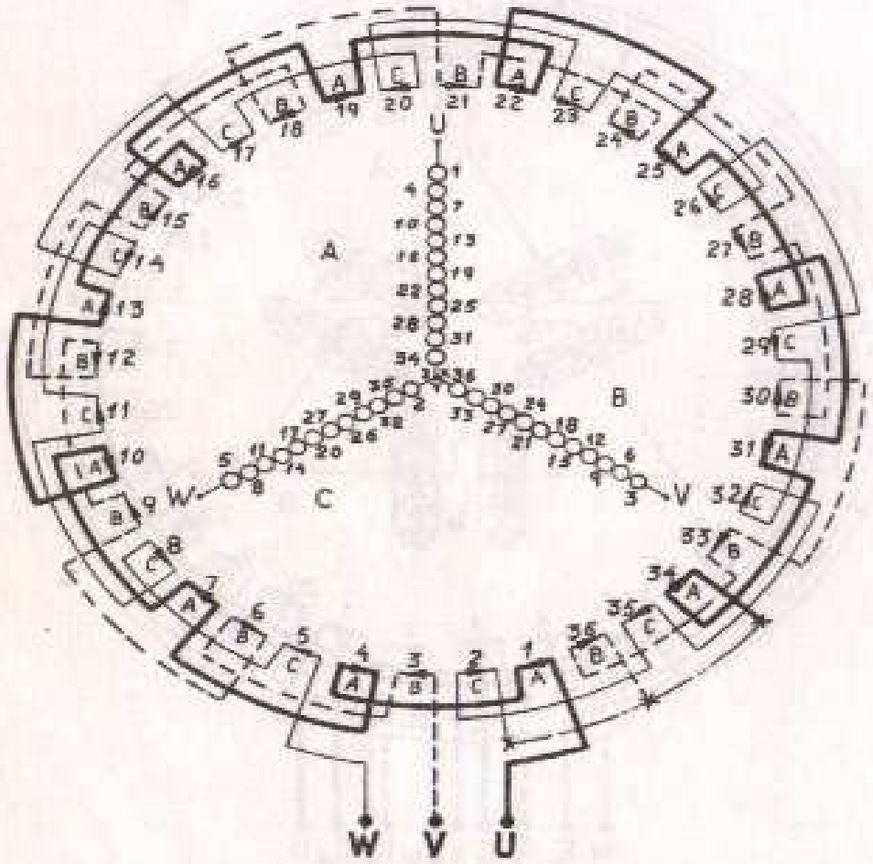


Conexión triángulo serie: $F_{13} \rightarrow F_{16}$, $F_{15} \rightarrow F_{18}$, $F_{17} \rightarrow F_{20}$
Conexión triángulo doble paralelo: $U \rightarrow F_{16}$, $F_{13} \rightarrow X$
$V \rightarrow F_{18}$, $F_{15} \rightarrow Y$
$W \rightarrow F_{20}$, $F_{17} \rightarrow Z$

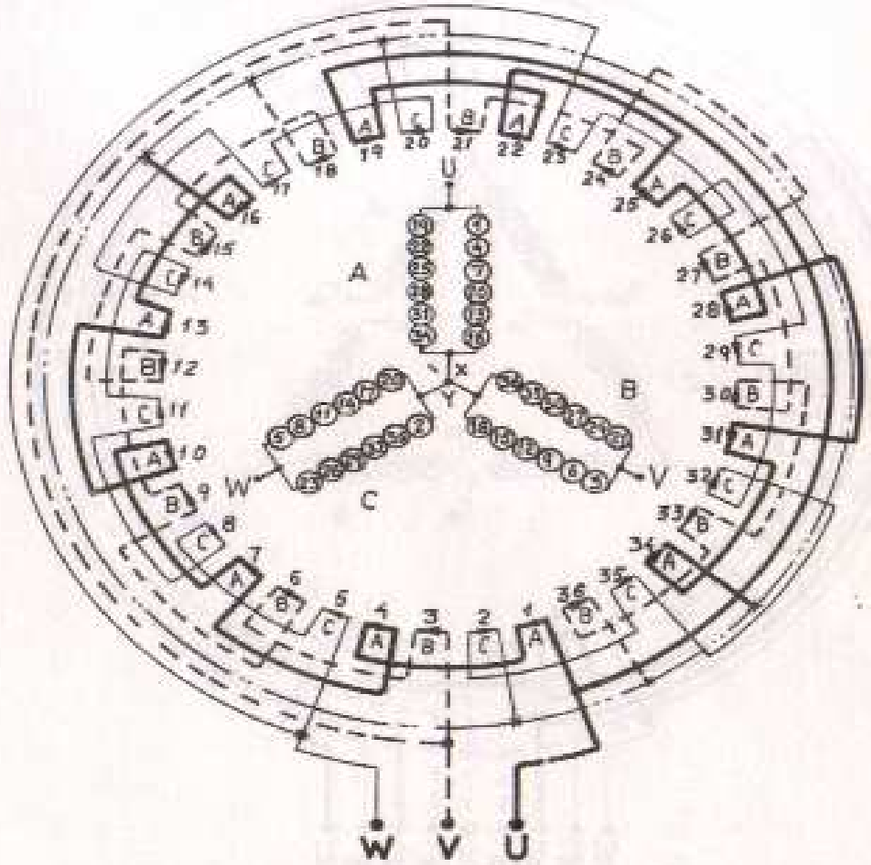


Conexión triángulo quíntuple paralelo: $F_1 \rightarrow F_{16}$, $F_3 \rightarrow F_{18}$, $F_5 \rightarrow F_{20}$
Conexión triángulo décuple paralelo: $U \rightarrow F_{16}$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow F_{18}$, $F_3 \rightarrow Y$
$W \rightarrow F_{20}$, $F_5 \rightarrow Z$

2p=12. Polos alternados

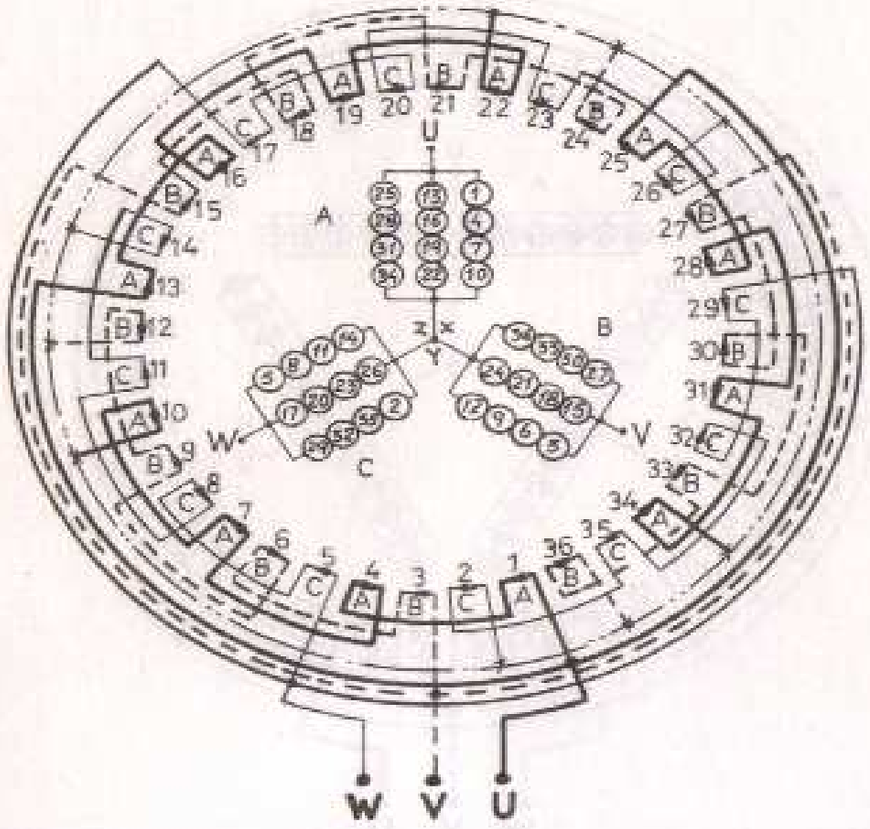


Conexión estrella serie

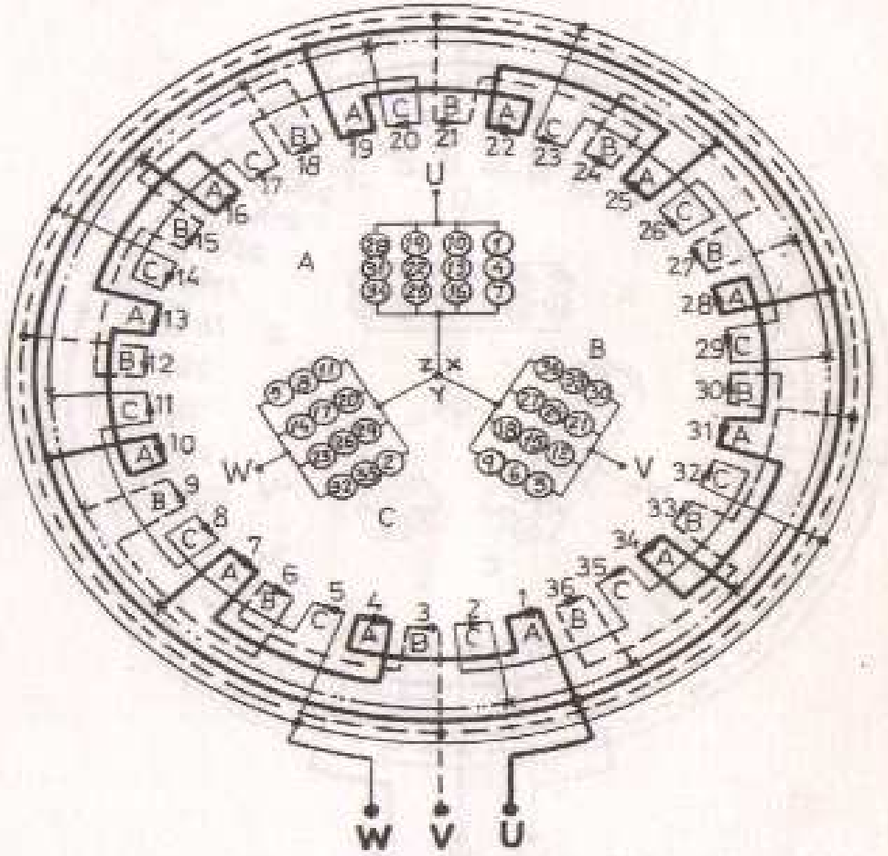


Conexión estrella doble paralelo

2p=12. Polos alternados

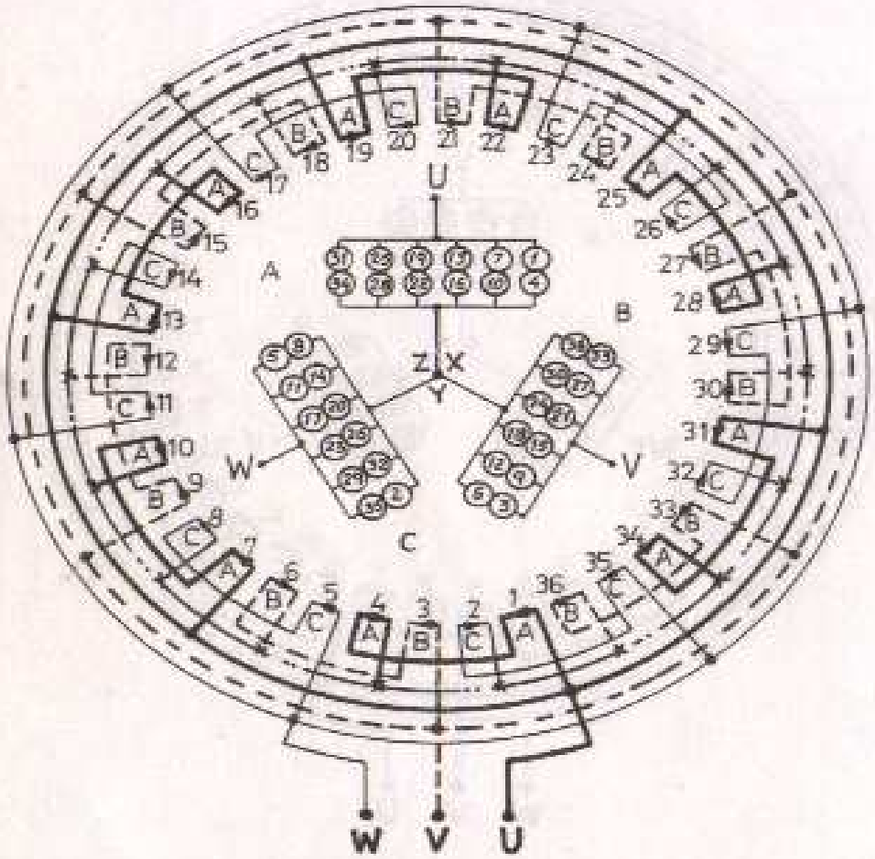


Conexión estrella triple paralelo

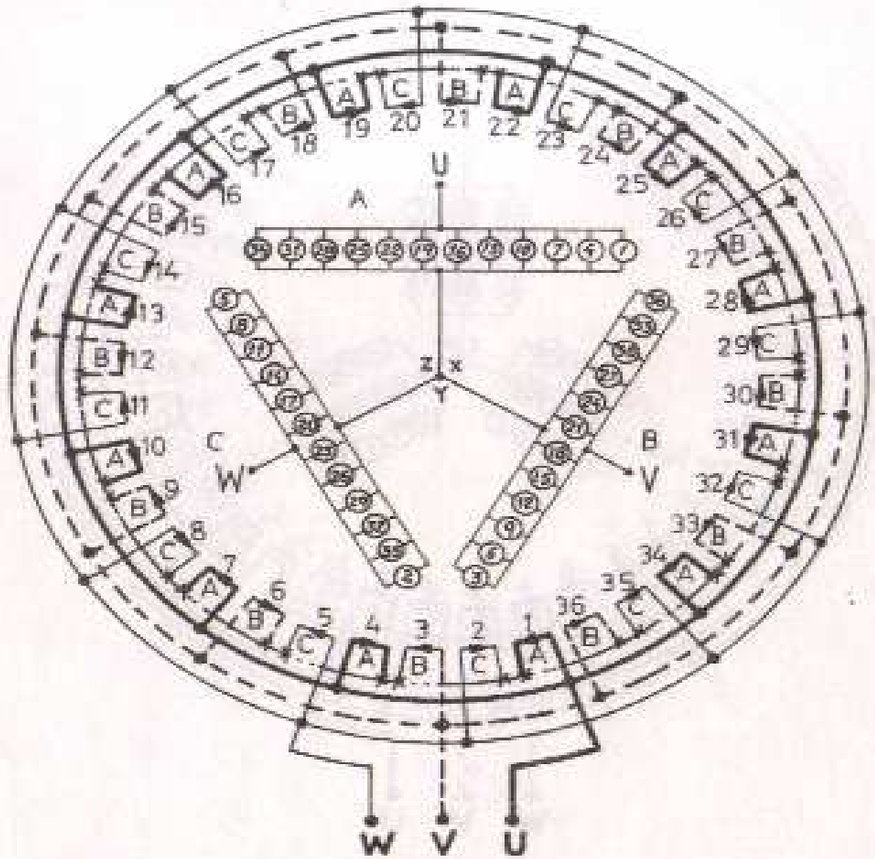


Conexión estrella cuádruple paralelo

2p = 12. Polos alternados

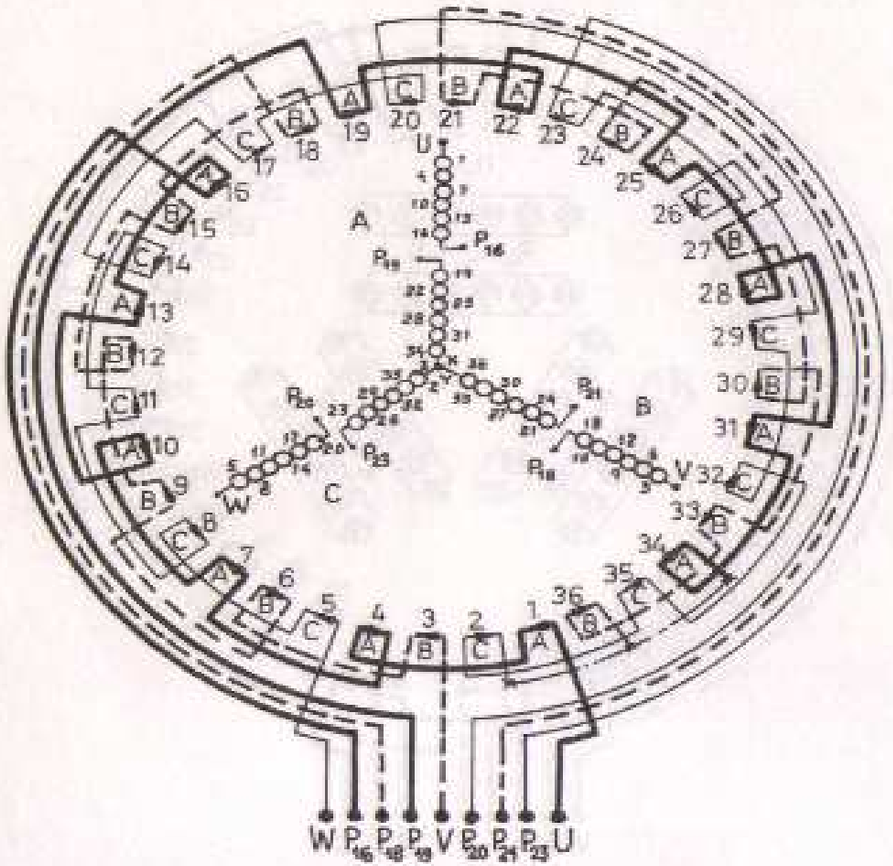


Conexión estrella séxtuple paralelo

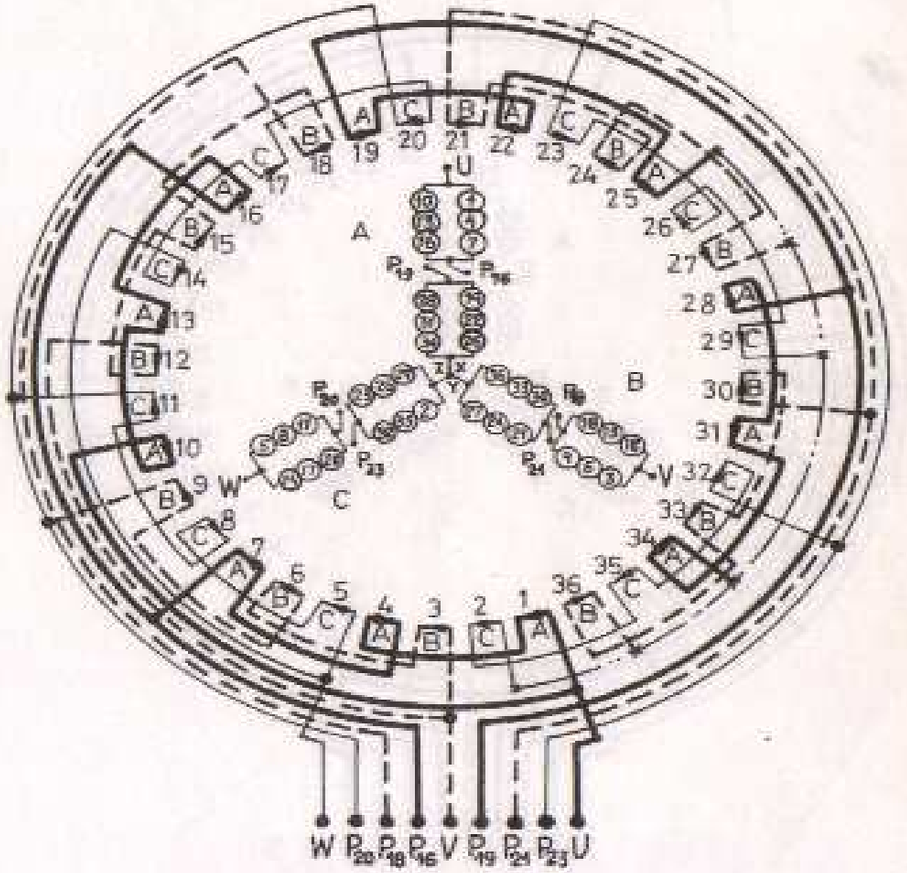


Conexión estrella con doce ramas en paralelo

2p=12. Polos alternados

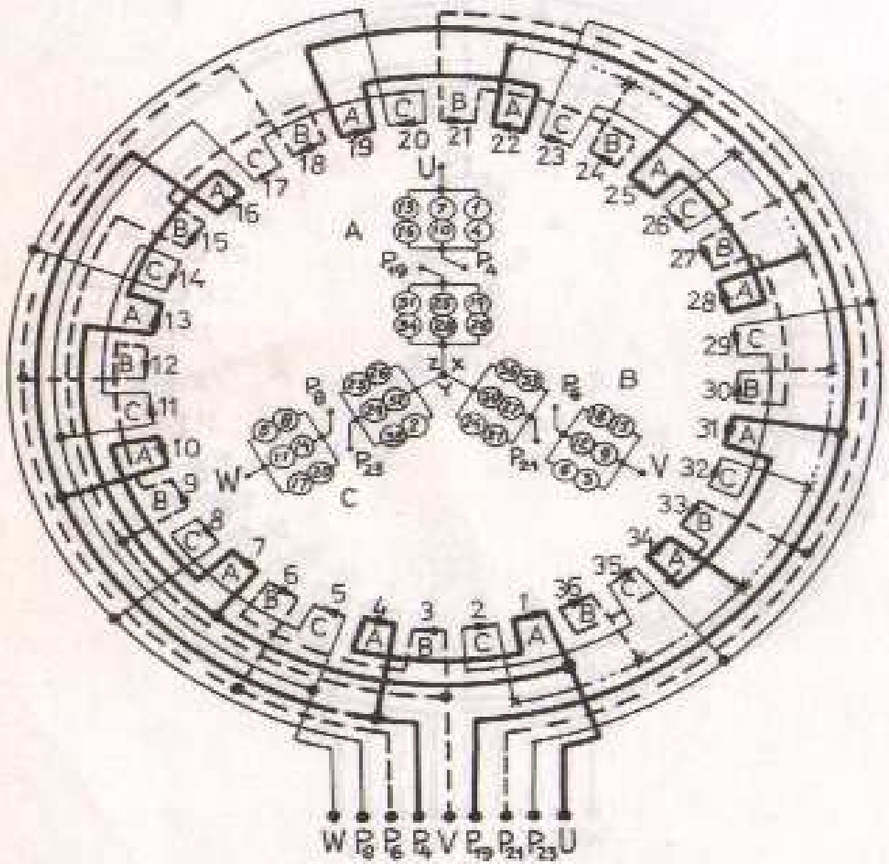


Conexión estrella serie: $P_{16} \rightarrow P_{19}$, $P_{18} \rightarrow P_{21}$, $P_{20} \rightarrow P_{23}$
Conexión estrella doble paralelo: $U \rightarrow P_{19}$, $P_{16} \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{21}$, $P_{18} \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{23}$, $P_{20} \rightarrow Z$

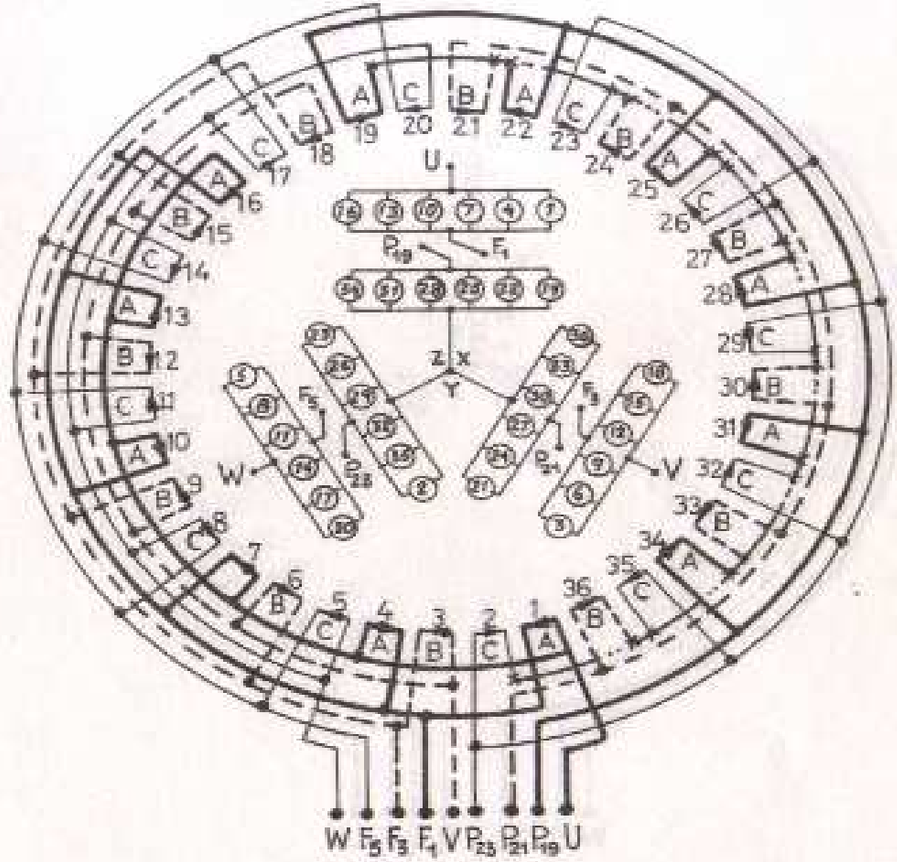


Conexión estrella doble paralelo: $P_{16} \rightarrow P_{19}$, $P_{18} \rightarrow P_{21}$, $P_{20} \rightarrow P_{23}$
Conexión estrella cuádruple paralelo: $U \rightarrow P_{19}$, $P_{16} \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{21}$, $P_{18} \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{23}$, $P_{20} \rightarrow Z$

2p = 12. Polos alternados

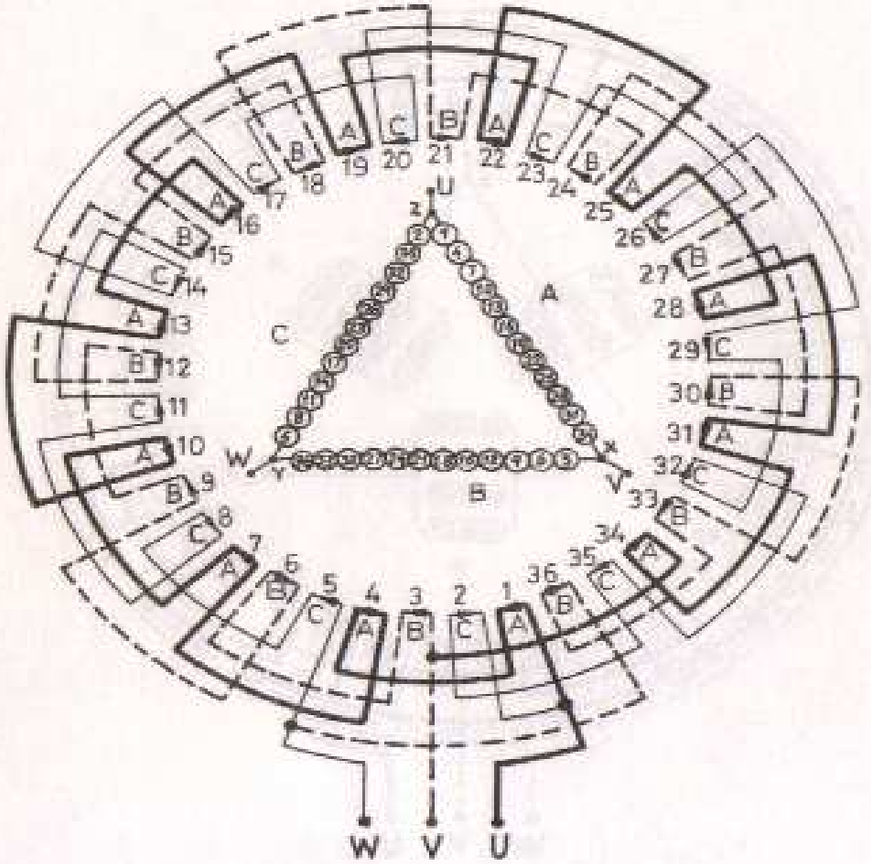


Conexión estrella triple paralelo : $P_4 \rightarrow P_{19}$, $P_6 \rightarrow P_{21}$, $P_8 \rightarrow P_{23}$
Conexión estrella séxtuple paralelo : $U \rightarrow P_{19}$, $P_4 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{21}$, $P_6 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{23}$, $P_8 \rightarrow Z$

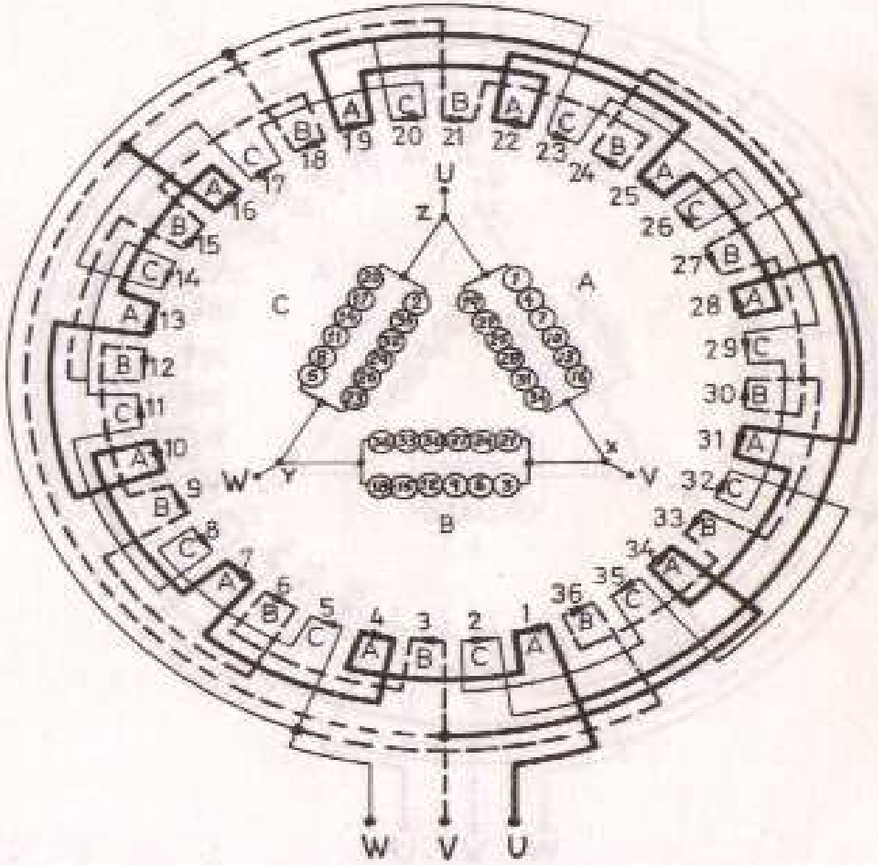


Conexión estrella séxtuple paralelo : $F_1 \rightarrow P_{19}$, $F_3 \rightarrow P_{21}$, $F_5 \rightarrow P_{23}$
Conexión estrella con doce ramas en paralelo : $U \rightarrow P_{19}$, $F_1 \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{21}$, $F_3 \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{23}$, $F_5 \rightarrow Z$

2p=12. Polos alternados

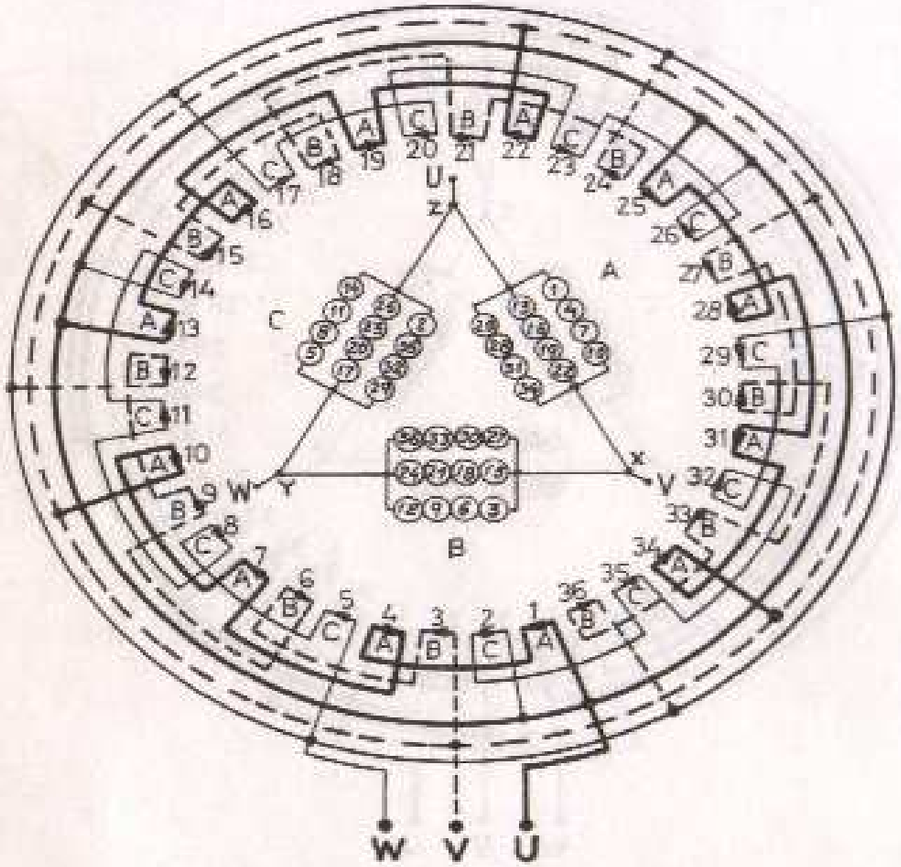


Conexión triángulo serie

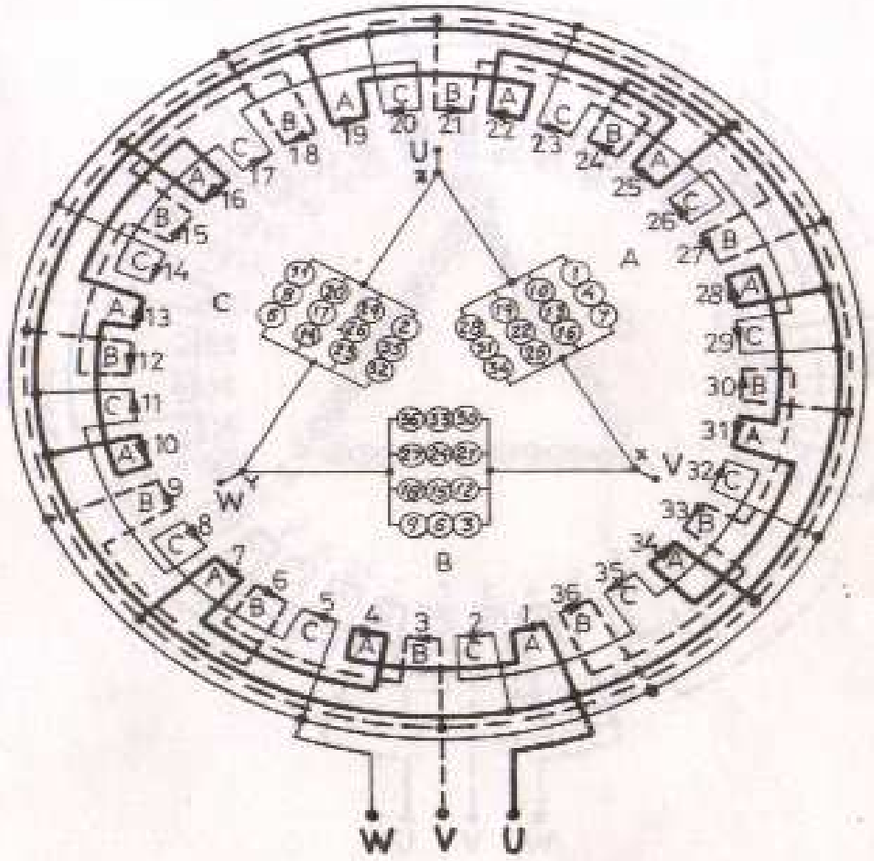


Conexión triángulo doble paralelo

2p=12. Polos alternados

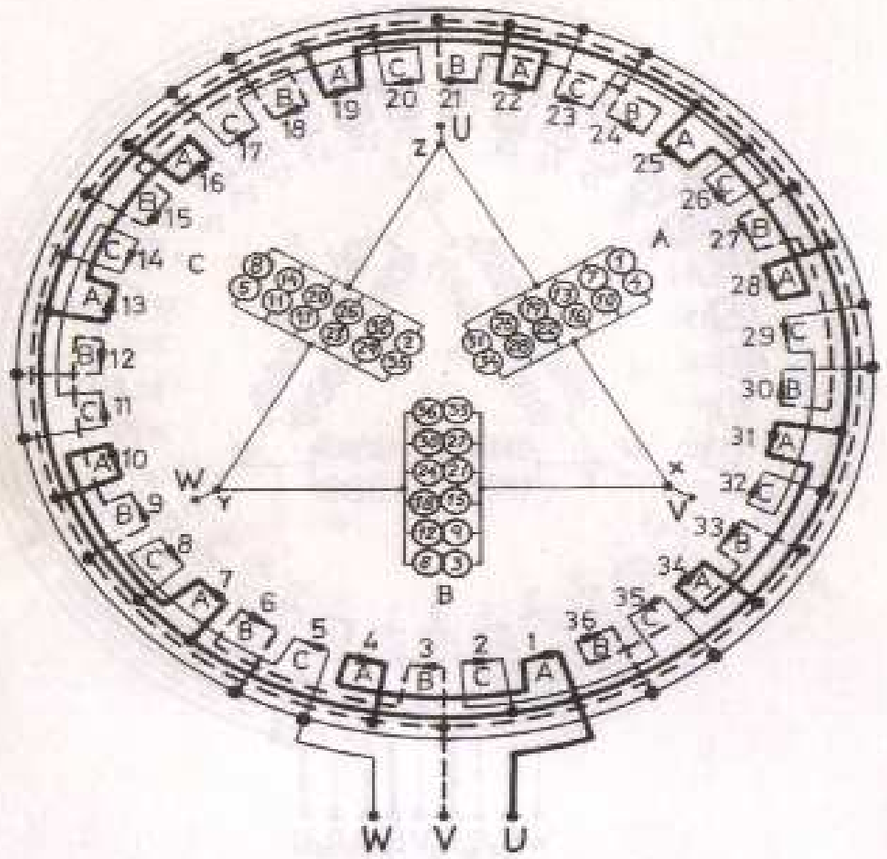


Conexión triángulo triple paralelo

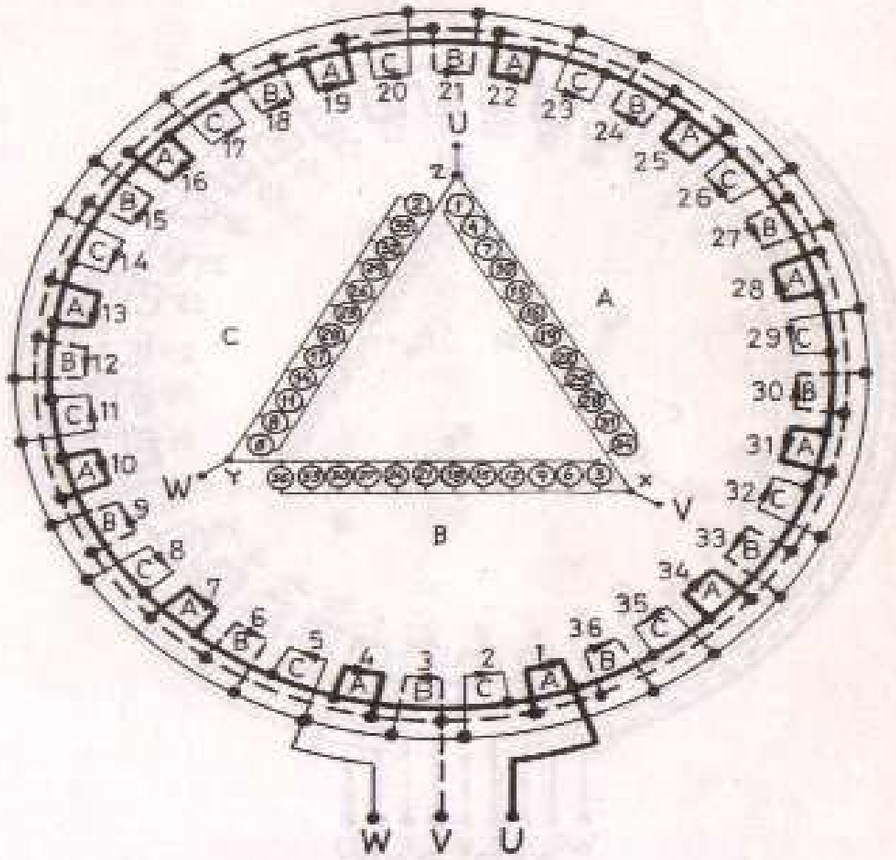


Conexión triángulo cuádruple paralelo

2p=12. Polos alternados

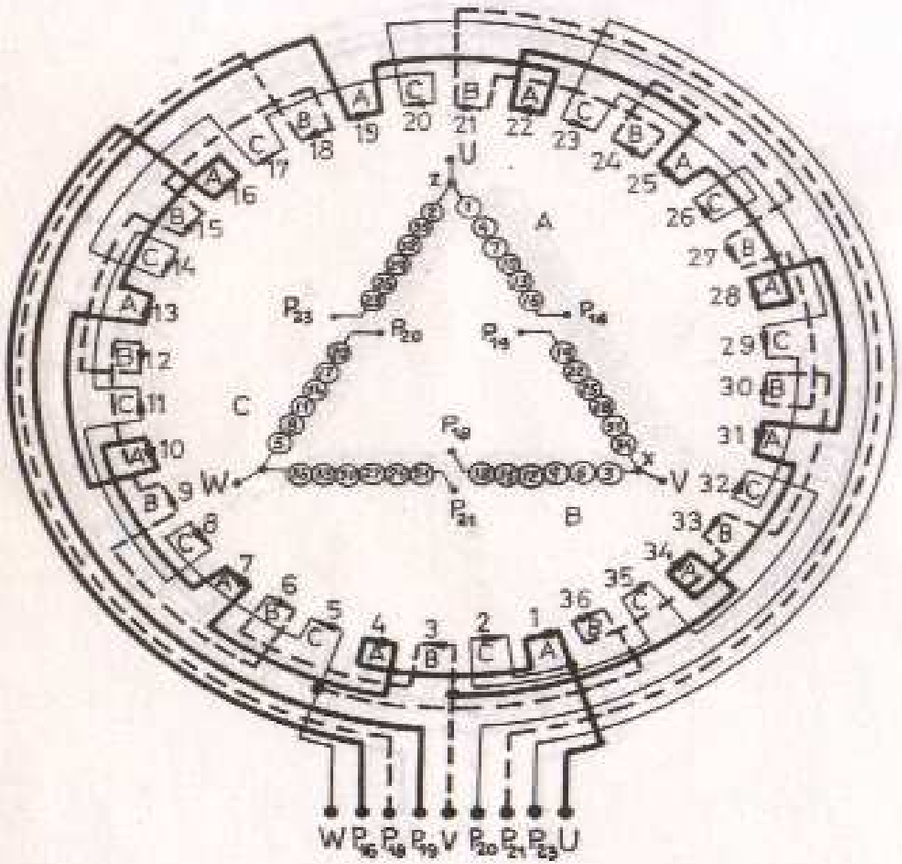


Conexión triángulo séxtuple paralelo

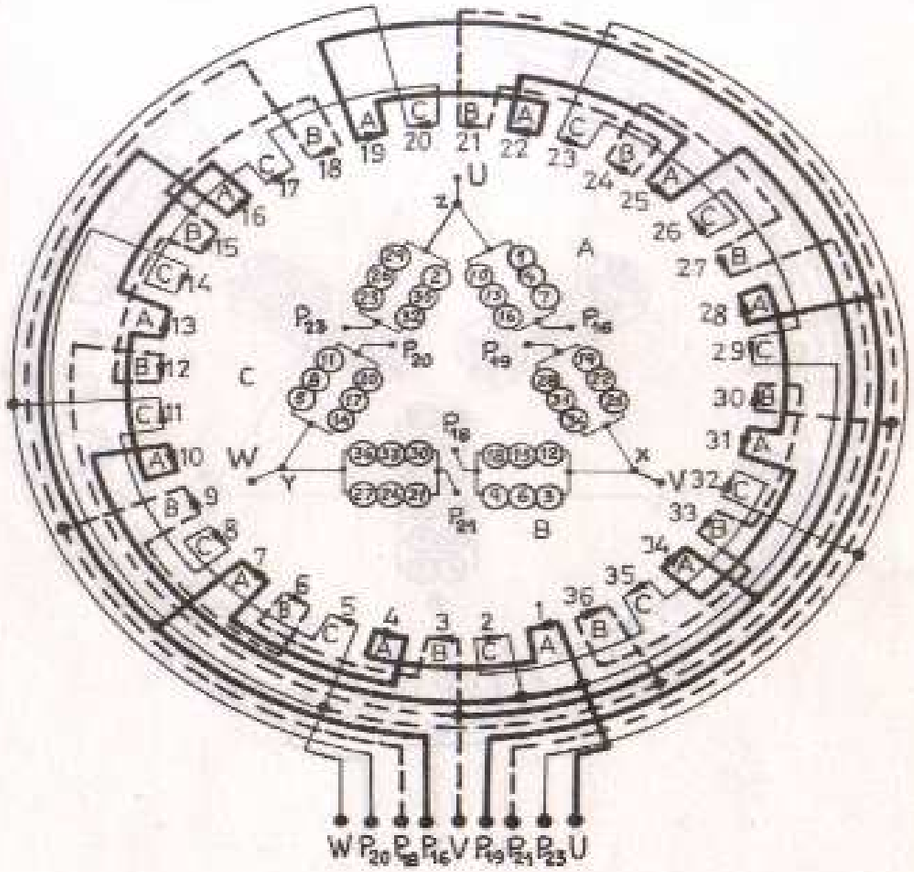


Conexion triángulo con doce ramas en paralelo

2p=12. Polos alternados

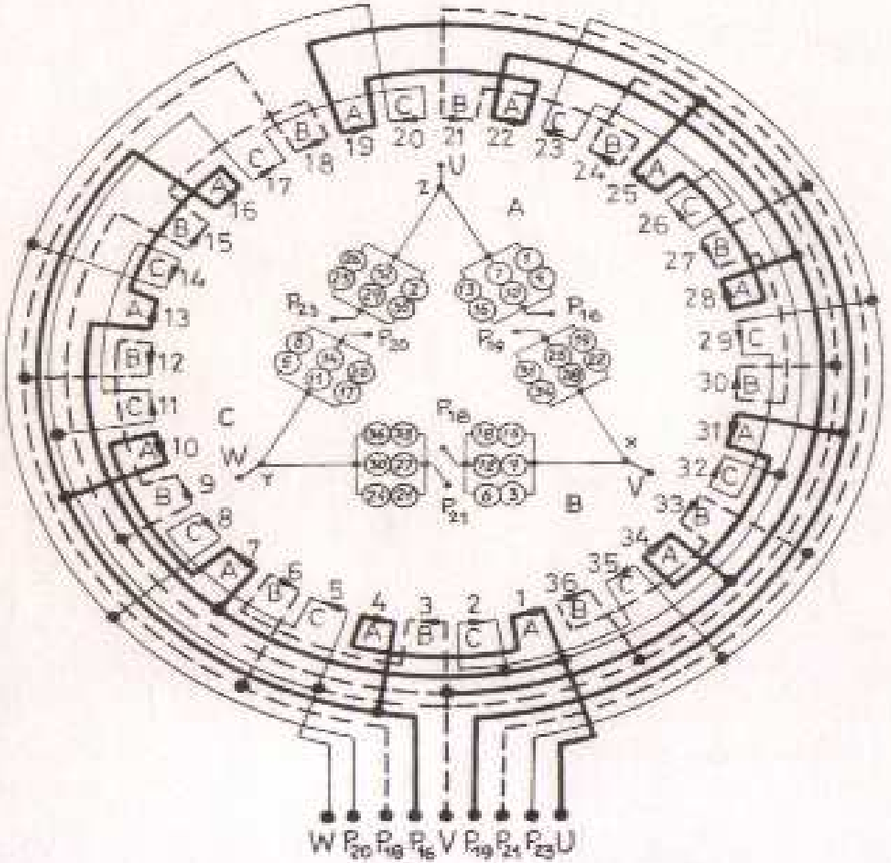


Conexión triángulo serie: $P_{16} \rightarrow P_{19}$, $P_{18} \rightarrow P_{21}$, $P_{20} \rightarrow P_{23}$
Conexión triángulo doble paralelo: $U \rightarrow P_{19}$, $P_{16} \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{21}$, $P_{18} \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{23}$, $P_{20} \rightarrow Z$



Conexión triángulo doble paralelo: $P_{16} \rightarrow P_{19}$, $P_{18} \rightarrow P_{21}$, $P_{20} \rightarrow P_{23}$
Conexión triángulo cuádruple paralelo: $U \rightarrow P_{19}$, $P_{16} \rightarrow X$
$V \rightarrow P_{21}$, $P_{18} \rightarrow Y$
$W \rightarrow P_{23}$, $P_{20} \rightarrow Z$

2p=12. Polos alternados

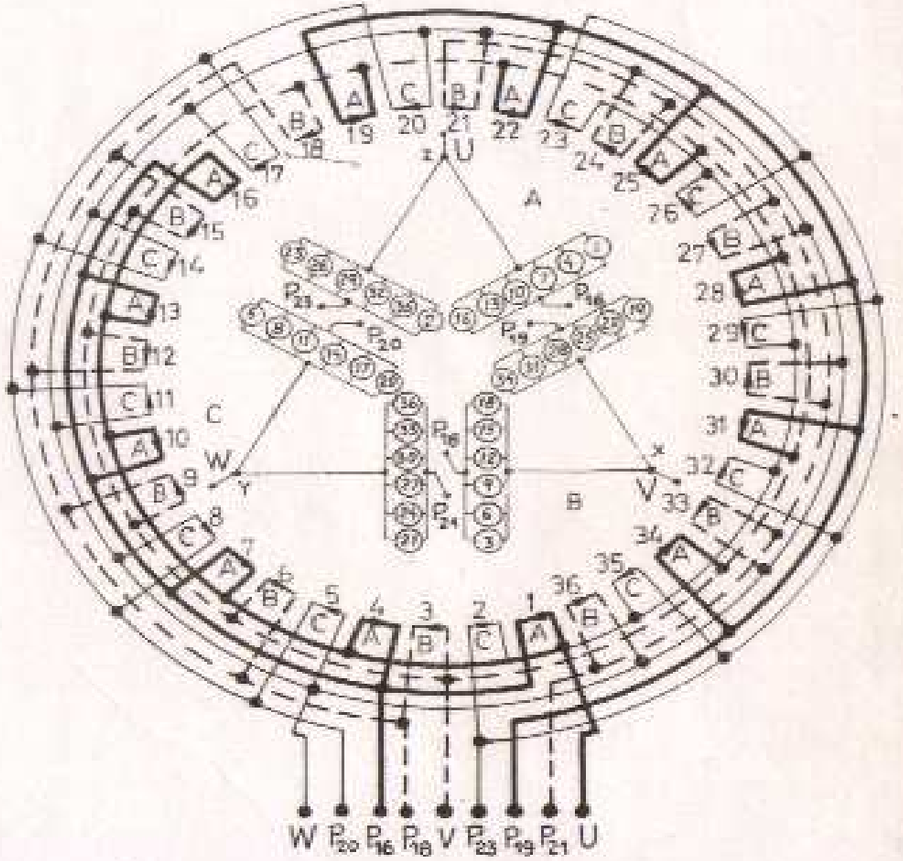


Conexión triángulo triple paralelo: $P_{16} \rightarrow P_{19}$, $P_{18} \rightarrow P_{21}$, $P_{20} \rightarrow P_{23}$

Conexión triangulo séxtuple paralelo: $U \rightarrow P_{19}$, $P_{16} \rightarrow X$

$V \rightarrow P_{21}$, $P_{18} \rightarrow Y$

$W \rightarrow P_{23}$, $P_{20} \rightarrow Z$



Conexión triángulo séxtuple paralelo: $P_{16} \rightarrow P_{19}$, $P_{18} \rightarrow P_{21}$, $P_{20} \rightarrow P_{23}$

Conexión triángulo con doce ramas en paralelo: $U \rightarrow P_{19}$, $P_{16} \rightarrow X$

$V \rightarrow P_{21}$, $P_{18} \rightarrow Y$

$W \rightarrow P_{23}$, $P_{20} \rightarrow Z$

TERCERA PARTE

I. Conductores y aislamientos

II. Recepción, revisión, desmontaje y toma de datr—

III. Procesos del bobinado de máquinas eléctricas

IV. Averías, su localización y reparación

V. Factor de bobinado

VI. Modificaciones en los motores trifásicos

CAPITULO I

CONDUCTORES Y AISLAMIENTOS

1. Introducción

El cobre electrolítico es el material conductor empleado por excelencia en los arrollamientos de las máquinas eléctricas.

En la mayoría de las máquinas pequeñas y medianas, el cobre interviene como hilo de sección circular, de diámetro constante en toda la longitud, recubierto con aislamiento.

La misión esencial del aislamiento es evitar todo contacto eléctrico entre el cobre conductor y las partes metálicas (masa) de la máquina, así como el contacto de los hilos de cobre entre sí (cortocircuito).

En algunas máquinas eléctricas, sobre todo en las grandes, el cobre puede intervenir en forma de barras de sección rectangular (pletinas) que también van provistas de aislamiento.

Para los rotores en jaula de ardilla, de las máquinas asincrónicas, se utilizan perfiles de cobre que, a menudo, presentan la misma sección que la de las ranuras donde se insertan. En dichos rotores se emplean, asimismo, otros materiales conductores, principalmente el aluminio (que se inyecta en las ranuras en estado de fusión), y también el latón.

Para prevenir suficientemente los posibles contactos eléctricos (masa o cortocircuito), se emplean, además, otros aislamientos, que se disponen en las ranuras, en las cabezas de las bobinas, entre las fases, etc.

En este capítulo examinaremos cuanto se refiere a aislamientos de máquinas eléctricas, incluidos los procesos de secado e impregnación.

2. Aislamientos, propiedades; clasificación térmica

Los aislamientos eléctricos están constituidos por materiales que, además de su característica esencial de no permitir el paso de la corriente eléctrica a su través, deben poseer determinadas propiedades. Así, los aislamientos ideales:

— Presentan una elevada resistencia mecánica.
— Se pueden trabajar con facilidad.
— Son térmicamente estables.
— No absorben la humedad, que les disminuiría su poder aislante.
— No son atacados por agentes exteriores.
— Mantienen las propiedades citadas, incluso bajo la temperatura de funcionamiento de la máquina eléctrica.

De acuerdo con la temperatura límite que es capaz de soportar prolongadamente un aislamiento, sin modificación de sus propiedades características, se clasifican en:

— *Aislamientos de clase Y:* Temperatura límite 90° C.
Compuestos de materiales tales como algodón, seda y papel, sin impregnación.

— *Aislamientos de clase A:* Temperatura límite 105° C.
Compuestos de los mismos materiales de la clase *Y*, pero que han sido convenientemente impregnados, o sumergidos en aceites.

— *Aislamientos de clase E:* Temperatura límite 120° C.
Compuestos de materiales tales como resinas sintéticas, estratificados de papel y algodón, etc., siempre que puedan soportar temperaturas hasta de 120° C.

— *Aislamientos de clase B:* Temperatura límite 130° C.
Compuestos de materiales tales como la mica, fibra de vidrio, amianto, etc., con aglomerantes adecuados, que son precisamente los que definen la clase *B*.

— *Aislamientos de clase F.* Temperatura límite 155° C.
Compuestos de los materiales soportes iguales a los de la clase *B*, pero con aglomerantes que pueden soportar temperaturas hasta de 155° C.

— *Aislamientos de clase H:* Temperatura límite 180° C.

Compuestos de materiales tales como siliconas, o asociación de materiales como mica, fibra de vidrio, etc., con aglomerados adecuados (por ejemplo: resinas de siliconas).

— *Aislamientos de clase C:* Temperaturas superiores a 180° C.

Compuestos de materiales tales como la mica, porcelana, cuarzo y vidrio, con o sin encolante inorgánico.

A cada grupo térmico citado, pueden incorporarse aquellos materiales aislantes que esté demostrado eficientemente que mantienen sus propiedades originales bajo las temperaturas límites correspondientes.

3. Aislamientos de los conductores

Los conductores de todos los arrollamientos de una máquina eléctrica deben ir cubiertos por un aislamiento adecuado a la tensión que han de soportar, así como a la temperatura y condiciones de funcionamiento.

Por otra parte, los conductores con aislamiento, además de presentar idéntico espesor y propiedades en toda su longitud, deben tener una flexibilidad tal que les permita tomar, sin dificultad ni deterioro, la forma particular requerida por el arrollamiento.

Y, también, deben tener una resistencia mecánica (especialmente a la flexibilidad y al roce) que sea suficiente para soportar, sin daño, las tensiones ejercidas sobre el hilo al confeccionar las bobinas.

La capa aislante (que puede ser múltiple) de los conductores ocasiona un aumento del volumen total del arrollamiento, de modo que éste requiere mayor espacio en la máquina. En los últimos años, se han logrado excelentes aislamientos de conductores, de todas las clases térmicas, cuyo espesor es muy reducido, con el consiguiente ahorro de espacio para el arrollamiento, es decir, aumento de la potencia de la máquina para el mismo volumen.

4. Diversos aislamientos de conductores

Citaremos los siguientes:

— *Hilo de algodón y seda:*

Materiales que, hasta hace poco tiempo, eran casi los únicos empleados para el aislamiento de conductores.

Tienen buena resistencia mecánica, y gran flexibilidad.

Sus inconvenientes son la absorción de humedad y su baja clase térmica.

Los aislamientos de seda se emplean, principalmente, para conductores de pequeños diámetros, en una o más capas.

Los aislamientos de algodón son más baratos, por lo que se utilizan para conductores de diámetros grandes, en una o varias capas. Actualmente son de poco uso.

— *Hilos esmaltados:*

De aplicación relativamente reciente, cada vez más extendida.

Presentan excelentes condiciones aislantes, no absorben la humedad, y su clase térmica puede llegar hasta la *H*.

En principio, todos los esmaltes utilizados eran grasos, pero éstos tienen el inconveniente de presentar poca resistencia mecánica.

Actualmente, se emplean con preferencia esmaltes sintéticos, de gran dureza, flexibilidad y adherencia.

La tabla 1 muestra las medidas, tolerancias y otras características importantes de los hilos de cobre *FLEXIDUR*, de la empresa *AISMALIBAR*, con dos capas de esmalte sintético. Son hilos de excelente resistencia mecánica, por lo que son especialmente recomendables para máquinas automáticas de bobinar.

En dicha tabla, para diámetros entre 0,04 y 5,0 mm, se dan (del hilo desnudo) las secciones correspondientes, la tolerancia en la medida del diámetro, la resistencia óhmica por metro lineal, y (del hilo esmaltado) el diámetro exterior máximo y el peso por kilómetro.

La tabla 2 compara las diferentes propiedades esenciales de diversos hilos esmaltados de *AISMALIBAR*. La ventaja de los hilos esmaltados sintéticos sobre el hilo de esmalte graso *OLEO-RESINOSO*, es evidente en cuanto a las propiedades mecánicas, según se desprende de la tabla.

En dicha tabla se tienen en cuenta: las propiedades mecánicas (flexibilidad, dureza, resistencia); las propiedades dieléctricas (rigidez y resistencia óhmica); la resistencia a diversos agentes químicos (agua, disolventes, etc.); la resistencia térmica y, finalmente, la soldabilidad.

Cuando los arrollamientos deban estar sometidos a violentos esfuerzos mecánicos (por ejemplo: los de los rotores que giran a grandes velocidades), se recomienda utilizar hilos con doble capa de esmalte.

EJEMPLO DE CARACTERISTICAS DE HILOS ESMALTADOS

Tabla 1: *Características de los hilos FLEXIDUR (2 capas de esmalte sintético), de AISMALIBAR.*

Hilo de cobre						Aumento mínimo de Ø por esmalte, mm	Hilo esmaltado	
Diámetro nominal mm	Sección mm²	Tolerancia en el Ø ± mm	Resistencia en Ohmios por metro lineal a 70° C				Diámetro exterior máximo, mm	Peso kg 1.000 m
			Mínimo	Nominal	Máximo			
0.04	0.00126	0.002	12.15	13.36	15.77	0.011	0.057	0.013
0.05	0.00196		8.05	8.91	9.83	0.013	0.071	0.019
0.06	0.00283		5.84	6.21	6.59	0.013	0.081	0.027
0.07	0.00385		4.285	4.559	4.833	0.016	0.090	0.036
0.08	0.00503	0.003	3.261	3.490	3.699	0.016	0.106	0.046
0.09	0.00636		2.593	2.758	2.923	0.019	0.120	0.062
0.10	0.00785		2.100	2.234	2.366	0.019	0.130	0.075
0.11	0.00950		1.735	1.846	1.957	0.019	0.140	0.090
0.12	0.01131		1.458	1.551	1.644	0.019	0.150	0.107
0.13	0.01327	0.004	1.243	1.322	1.401	0.025	0.169	0.127
0.14	0.01539		1.072	1.140	1.208	0.025	0.179	0.147
0.15	0.01769		0.933	0.993	1.053	0.025	0.189	0.168
0.16	0.02011	0.005	0.821	0.873	0.925	0.025	0.200	0.190
0.17	0.02270		0.727	0.773	0.819	0.025	0.210	0.215
0.18	0.02545		0.649	0.689	0.730	0.025	0.220	0.239
0.19	0.02835		0.582	0.619	0.656	0.025	0.230	0.266
0.20	0.03142		0.526	0.558	0.591	0.025	0.240	0.294
0.21	0.03464		0.482	0.507	0.532	0.030	0.255	0.327
0.22	0.03801		0.4384	0.4615	0.4846	0.030	0.265	0.358
0.23	0.04155		0.4012	0.4223	0.4434	0.030	0.275	0.391
0.24	0.04584		0.3684	0.3878	0.4072	0.030	0.285	0.424
0.25	0.04909		0.3395	0.3574	0.3753	0.030	0.295	0.459
0.26	0.05310	0.007	0.3139	0.3304	0.3469	0.030	0.307	0.498
0.27	0.05725		0.2911	0.3064	0.3217	0.030	0.317	0.536
0.28	0.06158		0.2707	0.2849	0.2991	0.035	0.332	0.575
0.29	0.06605		0.2523	0.2656	0.2789	0.035	0.342	0.616
0.30	0.07069		0.2358	0.2482	0.2606	0.035	0.352	0.658
0.35	0.09621		0.1732	0.1823	0.1914	0.040	0.408	0.896
0.40	0.1257		0.1326	0.1396	0.1466	0.045	0.465	1.150
0.45	0.1590	0.009	0.1059	0.1103	0.1147	0.050	0.523	1.470
0.50	0.1964		0.0858	0.0894	0.0930	0.055	0.579	1.800
0.55	0.2376		0.0708	0.0738	0.0768	0.060	0.635	2.190
0.60	0.2827		0.0596	0.0621	0.0646	0.065	0.692	2.60
0.65	0.3318		0.0508	0.0529	0.0550	0.070	0.747	3.05
0.70	0.3848		0.04377	0.04559	0.04741	0.075	0.804	3.64

Hilo de cobre						Aumento mínimo de Ø por esmalte, mm	Hilo esmaltado	
Diámetro nominal mm	Sección, mm²	Tolerancia en el Ø, ± mm	Resistencia en Ohmios por metro lineal a 20° C				Diámetro exterior máximo, mm	Peso kg 1.000 m
			Mínimo	Nominal	Máximo			
0.75	0.4418	0.012	0.03812	0.03971	0.04130	0.080	0.882	4.08
0.80	0.5026		0.03350	0.03490	0.03630	0.080	0.912	4.62
0.85	0.5674		0.02968	0.03092	0.03216	0.085	0.967	5.20
0.90	0.6362		0.02648	0.02758	0.02868	0.085	1.017	5.82
0.95	0.7088		0.02376	0.02475	0.02574	0.090	1.072	6.47
1.00	0.7854		0.02145	0.02234	0.02323	0.090	1.122	7.17
1.10	0.9503	0.016	0.01781	0.01845	0.01911	0.095	1.236	8.71
1.20	1.1310		0.01497	0.01551	0.01605	0.095	1.336	10.30
1.30	1.3273		0.01276	0.01322	0.01368	0.095	1.436	12.10
1.40	1.5394		0.01100	0.01140	0.01180	0.095	1.536	14.00
1.50	1.7671	0.020	0.0096	0.00993	0.01020	0.095	1.640	16.10
1.60	2.011		0.0085	0.00873	0.00896	0.100	1.750	18.20
1.70	2.270		0.00752	0.00773	0.00794	0.100	1.850	20.50
1.80	2.545	0.025	0.00670	0.00689	0.00708	0.100	1.955	23.10
1.90	2.835		0.00603	0.00619	0.00635	0.100	2.055	25.60
2.00	3.142		0.00544	0.00559	0.00572	0.110	2.175	28.40
2.10	3.464		0.00495	0.00507	0.00519	0.110	2.275	31.30
2.20	3.801		0.00450	0.00461	0.00472	0.110	2.375	34.30
2.30	4.155	0.030	0.00411	0.00422	0.00434	0.110	2.480	37.40
2.40	4.524		0.00378	0.00387	0.00397	0.110	2.580	40.90
2.50	4.909		0.00348	0.00357	0.00365	0.110	2.680	44.30
2.60	5.310		0.00322	0.003304	0.00339	0.110	2.780	47.80
2.70	5.725		0.00299	0.003084	0.00313	0.110	2.880	51.60
2.80	6.158		0.00278	0.002849	0.002911	0.110	2.980	55.40
2.90	6.605		0.002600	0.002656	0.002712	0.110	3.080	59.50
3.00	7.069		0.002431	0.002482	0.002533	0.110	3.180	63.60
3.50	9.621	0.040	0.001796	0.001823	0.001850	0.120	3.700	86.30
4.00	12.57		0.001368	0.001386	0.001424	0.120	4.200	112.8
4.50	15.90	0.050	0.001081	0.001103	0.001125	0.130	4.720	143.0
5.00	19.64		0.000876	0.000894	0.000912	0.130	5.220	176.0

Tabla 2: *Comparación de hilos esmaltados (AISMALIBAR).*

PROPIEDADES	HILO RESINOSO	FLEXIBLE	FLEXIBLE HERMÉTICO	SOLIDO	TERMOSOLO
PROPIEDADES MECÁNICAS					
Flexibilidad del esmalte	◔	◕	◕	◕	◕
Dureza del esmalte	◔	●	●	◑	◕
Resistencia a la abrasión	◔	●	●	◕	◕
PROPIEDADES DIELÉCTRICAS					
Rigidez dieléctrica en estado seco	●	●	●	●	●
Después de 24 horas dentro del agua	◕	◑	◑	◕	◕
Resistencia del aislamiento en estado seco	●	●	●	●	●
Después de 96 horas de 95 °C, h. r.	◕	◑	◑	◕	◕
RESISTENCIA QUÍMICA					
Resistencia al agua	◕	◑	◑	◕	◕
Resistencia a los disolventes	◔	◕	◕	◑	◕
Resistencia a los aceites calientes	◕	●	●	●	●
Resistencia a los dieléctricos clorados	◑	●	●	●	●
Resistencia al fredo 12	○	●	●	◕	◕
Resistencia al fredo 22	○	◕	●	◑	◕
RESISTENCIA TÉRMICA					
Temp. máx. de servicio °C	105	120	120	130	155
Termoplasticidad (1) °C	150	180	180	200	300
Choque térmico (2)	◑	●	●	◕	◕
SOLDABILIDAD	○	◑	◑	●	○

○ DEFICIENTE

● EXCELENTE

(1) Temperatura a la cual el hilo tiene tendencia a reblandecerse

(2) Un hilo arrollado sobre su propio diámetro y sometido en una estufa una hora a 150° C

— *Hilos cubiertos*, de alta resistencia térmica:

De utilización reciente, se trata de conductores de cobre, desnudo o esmaltado, cubiertos con una o más capas de fibras de vidrio, o de otros materiales tales como amianto, mica, etc.

Estos aislamientos presentan una alta estabilidad frente a la temperatura y los agentes externos (humedad, ácidos, vapores corrosivos, etcétera), por lo que se utilizan preferentemente en los arrollamientos de máquinas eléctricas especiales que trabajan a una elevada temperatura ambiente, o están sometidas a sobrecargas considerables, o bien funcionan en ambientes corrosivos, etc.

El espesor de estos aislamientos es muy superior al de los hilos esmaltados de igual diámetro, lo que, unido a la poca elasticidad del aislamiento, limita su empleo.

5. Aislamientos de ranuras y fases

Los lados de las bobinas de los arrollamientos van insertados en las correspondientes ranuras del rotor o estator. Para impedir cualquier contacto a masa, se disponen aislamientos que se amoldan a la periferia de las ranuras.

En los arrollamientos a dos capas, para prevenir posibles cortocircuitos entre los dos lados de bobinas que alberga cada ranura, se sitúan, además, aislamientos intermedios.

También, para mayor seguridad de aislamiento entre las cabezas de bobinas de las diferentes fases de un arrollamiento trifásico (o entre las cabezas de bobina y el hierro), se disponen aislamientos que separan las partes antedichas.

En el capítulo III, correspondiente a la inserción de los arrollamientos en la máquina eléctrica, veremos cómo se preparan las ranuras para recibir el aislamiento, y cómo se dispone éste, tanto en las ranuras como entre las fases. Ahora, nos ocuparemos solamente de los materiales utilizados.

En general, los aislamientos de ranuras y fases están constituidos por materiales compuestos laminares (folios o tejidos), que pueden ser cortados y doblados, o bien pueden ser moldeados (en frío o en caliente), hasta adquirir la forma conveniente en cada caso.

En casos particulares, los aislamientos de las ranuras consisten en tubos que se acoplan en el interior de la ranura.

El espesor y la calidad de los aislamientos debe estar de acuerdo con la tensión eléctrica de la máquina, así como con las condiciones de temperatura, agentes exteriores, etc.

Los aislantes son, como hemos dicho, materiales compuestos. En su formación pueden intervenir múltiples materiales, unos que actúan como soporte y otros que son los aislantes. El material soporte puede estar colocado en una o ambas caras del material aislante. La unión se consigue mediante barnices adhesivos y un prensado posterior. El soporte hace, en casos, las veces de aislamiento, y viceversa.

Entre los materiales de soporte se encuentran: tejidos de fibra de vidrio virgen, tejidos de fibra de vidrio barnizada, papel kraft, presspan, etc.

Los materiales aislantes pueden estar formados a base de: mica, triacetato de celulosa, tela barnizada, cloruro de polivinilo, poliéster, etc.

El aislamiento debe tener, además de sus características aislantes, las siguientes propiedades principales:

— Buena resistencia mecánica.
— Seguridad al pliegue, esto es, que no queden perjudicadas sus propiedades al hacer dobleces en el aislante.
— Elevada resistencia al desgarre.
— Elevada flexibilidad.
— Resistencia a la humedad y a los agentes exteriores.
— No ejercer efectos perjudiciales sobre el cobre.

En máquinas pequeñas se emplea, a menudo, la hoja de presspan-triacetato, o presspan-poliéster (clase térmica *E*). También se utilizan hojas de papel kraft-poliéster, y estratos triples: presspan-poliéster-presspan, etc. Dichas hojas pueden ser cortadas con tijeras o cizallas, y se les puede dar los dobleces necesarios sin dificultad, incluso a mano.

En la clase B se utilizan como aislantes folios de mica (micafolios), y micanita flexible, que se puede moldear en frío. Para mayores exigencias térmicas, en general para todas las máquinas eléctricas expuestas a un régimen constante de temperatura elevada y a sobrecargas, se emplean como material de soporte las fibras de vidrio.

El espesor del aislamiento queda esencialmente decidido por la tensión eléctrica de la máquina, y por el tipo del aislante a utilizar. Los fabricantes de aislamientos orientan al constructor sobre cualquier duda a este respecto.

6. Cuñas de cierre

Para que los lados de las bobinas no se salgan de las ranuras (cuando éstas no son cerradas), se cierran los extremos de las mismas con unas cuñas.

Los materiales de las cuñas de cierre están compuestos de un material soporte y una resina. Entre los soportes tenemos: papel, tejido de algodón, madera, amianto, tejidos de fibra de vidrio, etc. Como resinas se emplean: fenol-formol, siliconas, etc.

Cuando se trata de máquinas pequeñas o de mediana potencia, se suelen utilizar cuñas rígidas, en forma de media caña o secciones parecidas. El soporte es, generalmente, madera o papel.

En las máquinas de gran potencia (normalmente con ranuras abiertas), lo más corriente es el empleo de cuñas de sección trapecial.

7. Aislantes de cabezas, y aislantes y conductores para salida a bornes

En las máquinas eléctricas pequeñas, los aislamientos esenciales son los ya mencionados; actualmente no se encintan las cabezas de las bobinas.

En las máquinas medianas y grandes, siempre que trabajen a tensiones moderadas, no se suelen prever aislamientos suplementarios.

Cuando se trata de estatores de alta tensión, las cabezas de bobinas, al menos, se encintan con materiales aislantes tales como: papel, algodón, seda, presspan barnizados; papel-mica, seda-mica; fibra de vidrio-mica, etc.

Cuando se emplean bobinas preformadas, se suele encintar toda la bobina (salvo los terminales), es decir, tanto los lados como las cabezas. La cinta se arrolla de modo continuo, como una venda, operación que puede realizarse a mano o a máquina; en cualquier caso, la cinta debe quedar fuertemente apretada. En general, la bobina preformada se endurece con la ayuda de una resina sintética termoendurecible. Después de rellenados

los huecos restantes con una masilla, se aplica sobre las bobinas rígidas un barniz adhesivo que permite obtener una fuerte unión del aislamiento con la bobina. La cinta se aplica seguidamente, poniendo las vueltas a tope o solapadas.

Los terminales de los arrollamientos trifásicos no se llevan directamente a la caja de bornes, sino que se sueldan a cablecillos especiales compuestos por numerosos hilos de cobre de diámetro reducido, lo que les confiere gran flexibilidad.

Como aislamientos complementarios de las conexiones, y de los cables de salida a bornes, se utilizan cintas diversas. La tabla 3, al final del capítulo, muestra un conjunto de estos aislamientos complementarios, clasificados según su grado térmico, entre los fabricados por *AISMALIBAR*.

8. Impregnación de los arrollamientos: su objeto

Una vez dispuesto el arrollamiento en su espacio correspondiente, es muy importante someterlo a una impregnación con barniz aislante, operación a la que precede un secado para eliminar la humedad del arrollamiento.

La impregnación de los arrollamientos mediante barnices aislantes tiene por objeto principal:

— Mejorar el aislamiento, y protegerlo de la humedad.
— Favorecer la disipación del calor desarrollado en los arrollamientos, al rellenar todas las cavidades de aire, que es mal conductor del calor.
— Dar una rigidez mecánica al conjunto del arrollamiento.
— Proteger el arrollamiento de la acción de influencias exteriores (bacterias, termitas, vapores corrosivos, etc.).

9. Barnices aislantes; propiedades

Los barnices aislantes se fabrican a base de resinas, aceites, asfaltos, sustancias que — solas o combinadas entre sí — son disueltas en un medio de naturaleza volátil, que sirve de transporte del barniz.

Con el barniz aislante se impregnan los arrollamientos que han sido sometidos a un secado previo, para eliminar la humedad. Tras la impregnación, una vez evaporado el disolvente, queda en los arrollamientos un extracto seco o una película de barniz que se endurece con el calor.

Existen, además, otros barnices (llamados barnices sin disolvente) en los que las resinas polimerizan al añadir ciertas materias (catalizadores), utilizándose especialmente en motores de elevado número de r. p. m.

El barniz debe ser adecuado a las particulares exigencias de la máquina eléctrica donde haya de aplicarse. Como, en la práctica, no es posible disponer de un barniz universal que satisfaga todas las posibles exigencias, se fabrica una extensa gama de barnices aislantes, siendo necesario escoger el idóneo para cada caso.

Además de las esenciales características aislantes, es deseable (o imprescindible) que un barniz tenga las siguientes propiedades:

— Estabilidad térmica.
— Resistencia al envejecimiento.
— Buena conductibilidad calorífica.
— Máxima penetración, mínima contracción.
— Elasticidad.
— Resistencia a la humedad, ácidos, etc.
— No agresividad respecto de los hilos esmaltados.
— Resistencia a la centrifugación, o sea, fuerza cohesiva.

10. Clasificaciones de los barnices aislantes

Atendiendo a su composición, los barnices aislantes pueden ser clasificados como sigue:

— *Barnices grasos* (de poco uso actualmente):
Que son combinaciones de aceites secantes con resinas, asfaltos, cera y otras sustancias similares. Para la formación de la película, se requiere un secado que consta de tres fases:

1.ª Evaporación del disolvente.
2.ª Oxidación por aire, o por aire y calor simultáneamente.
3.ª Polimerización.

La formación de la película, en los barnices grasos, exige una aportación continua de aire, por lo que no es posible el secado en vacío.

— *Barnices sintéticos modificados con aceites:*

Que forman un grupo intermedio entre los barnices grasos y los barnices sintéticos propiamente dichos. Están constituidos por resinas gliceroftálicas, disolventes y secantes. Su secado consta de dos fases:

1.ª Evaporación del disolvente.
2.ª Polimerización y condensación por calor y ligera oxidación.

— *Barnices sintéticos combinados:*

Constituidos por combinación de diversas resinas sintéticas (de melamina, de urea, fenólicas, etc.). Térmicamente son más estables que los anteriores y presentan buena conductividad del calor. Su secado consta de dos fases:

1.ª Evaporación del disolvente.
2.ª Polimerización o condensación por calor.

Así, pues, no habiendo oxidación, en el proceso de secado no es necesaria la presencia de aire, por lo que pueden tratarse al vacío.

— *Barnices sintéticos especiales:*

De naturaleza análoga a los barnices anteriores combinados, pero con una aplicación concreta y especial.

Este grupo incluye los barnices de silicona, los barnices sin disolvente, etc. Los barnices sin disolvente polimerizan por calor o por la acción de catalizadores.

Otra clasificación de los barnices aislantes resulta al agruparlos según su clase térmica, de manera semejante a la expuesta para los aislamientos. Así:

— *Barnices aislantes de clase A:* Temperatura límite 105° C.

Que abarca todos los barnices grasos y sintéticos secados al aire, excepto los termoplásticos.

— *Barnices aislantes de clase E:* Temperatura límite 120° C.

Donde quedan incluidos todos los barnices grasos y sintéticos tratados al horno.

— *Barnices aislantes de clase B:* Temperatura límite 130° C.
Grupo al que pertenecen los barnices: grasos asfálticos, secados al horno; compuestos asfálticos especiales; gliceroftálicos; fenólicos modificados, etc.

— *Barnices aislantes de clase F:* Temperatura límite 155° C.
Que incluye los barnices sintéticos de melamina, de epoxi, de glyptal-silicona.

— *Barnices aislantes de clase H:* Temperatura límite 180° C.
Que comprende los barnices de siliconas y resinas especiales.

11. Control de un barniz aislante

Para tener la certeza de haber efectuado una buena protección de la máquina eléctrica, no es suficiente el haber empleado un barniz de excelente calidad sino, ante todo, haber aplicado el barniz en las debidas condiciones para que sus características no hayan sufrido variación.

Por esta razón, en la sala de impregnación del taller de bobinado, debe ser controlada:

— *La concentración del barniz:*

Que es el tanto por ciento de extracto seco que resta de un barniz, una vez evaporados los disolventes.

Se mide, de una muestra del barniz disuelto, pesando el extracto seco restante tras la evaporación del disolvente a una temperatura y con una duración prefijados (según las normas en vigor).

La concentración es un dato decisivo en la impregnación, ya que indica la masa de barniz que permanecerá en el arrollamiento, o sea, señala el grado de protección que se podrá alcanzar.

— *La viscosidad:*

Factor muy importante, del que depende el grado de penetración del barniz en el arrollamiento.

En los talleres, puede medirse con el viscosímetro *ASA*, que proporciona una medida cómoda, rápida y de suficiente exactitud.

Dicho viscosímetro consiste en un recipiente, en cuyo fondo hay un orificio y un cono cuyo vértice sirve de indicador (fig. 1).

Para la medición, se sumerge el recipiente, hasta llenarlo totalmente, en el barniz a experimentar (del que se ha sacado una muestra). Se extrae, entonces, manteniendo siempre horizontal el fondo del recipiente, y se cronometra el tiempo transcurrido desde que se sacó el viscosímetro hasta que aparece a la vista el vértice del cono indicador.

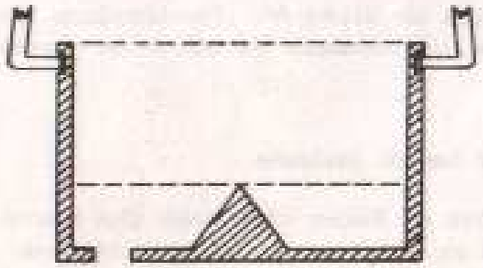


Fig. 1. — Sección del viscosímetro ASA, de Aismalibar.

El número de segundos expresa la viscosidad del barniz en unidades *ASA*. Si se quiere medir la viscosidad en centipoises, hay que consultar unas tablas de equivalencias (facilitadas en los catálogos de *AISMALIBAR)*.

Durante el empleo y almacenaje de los barnices, se producen pérdidas de disolvente, o polimerización parcial del mismo. Por ello, hay que comprobar la viscosidad del barniz a utilizar, y añadir disolvente (el adecuado) si es necesario.

La adición de disolvente (o de mezcla de disolventes) debe realizarse agitando continuamente el barniz, añadiendo el disolvente en forma de chorro fino, a una temperatura algo superior a la del barniz, que deberá estar a una temperatura ambiente no inferior a 15° C. Se podrá añadir disolvente sólo cuando no represente un rebaje demasiado importante de la materia fija.

12. Impregnación por inmersión

El proceso total consta de cuatro fases: Secado previo, inmersión en el barniz (impregnación propiamente dicha), escurrido y secado.

— *Secado previo:*

Que tiene por misión eliminar totalmente la humedad, antes de proceder a la impregnación.

La temperatura a que hay que someter los arrollamientos para eliminar la humedad es de 100-110° C durante 2-10 horas, según el tamaño pequeño o grande del motor a impregnar.

En ambos casos, los arrollamientos se deben dejar enfriar, sin refrigeración, dentro del horno, hasta una temperatura de 35° C.

En algunos casos que no se necesite una precaución extrema, en los barnices sintéticos se puede prescindir del secado previo.

— *Inmersión en el barniz:*

Inmediatamente después de la operación anterior, y sin que los bobinados puedan absorber humedad, se sumergen completamente en el barniz (en una cuba), hasta que cesen de aparecer burbujas en la superficie del barniz (en la práctica se deja unos cinco minutos, en motores medianos).

— *Escurrido:*

Cuando la formación de burbujas en la superficie del barniz cesa, se sacan los arrollamientos del baño, y se les deja escurrir durante ½ a 1 hora, a la temperatura ambiente.

Hay que asegurarse de que el escurrido es suficiente, de lo contrario se acumula barniz en las bases del arrollamiento.

Cuando se da más de una impregnación, es necesario cambiar cada vez la dirección del escurrido, en un ángulo de 180° (media vuelta).

— *Secado:*

Fase muy importante, pues de ella depende la calidad del aislamiento conseguido.

En primer lugar, hay que proceder a la evaporación de los disolventes, cuidando de su total eliminación.

La ventilación con aire (solamente necesaria para barnices grasos) debe ser lenta al principio, y más rápida al final del secado.

En los barnices sintéticos, la polimerización se produce simplemente por calor, pudiéndose prescindir de la ventilación, siempre que esté asegurado un reparto equitativo de las temperaturas en el interior del horno de secado (o autoclave).

17. Precauciones a tener en cuenta en la construcción e impregnación de arrollamientos

A continuación, se exponen las causas que, con más frecuencia, producen anomalías, ya que el éxito de una impregnación no depende tan sólo de la buena calidad del barniz empleado.

— *Exceso de tensión en el hilo, durante el bobinado:*

Si un hilo esmaltado sufre un alargamiento superior al 5-6 % (lo que puede suceder durante el bobinado), disminuyen sensiblemente las propiedades mecánicas del esmalte, así como su resistencia a los disolventes de los barnices de impregnación.

— *Falta de precaución al tratar los hilos esmaltados:*

A pesar de la gran resistencia mecánica de estos hilos, si se producen raspaduras profundas en el esmalte (lo que puede ocurrir al insertar las bobinas del arrollamiento en las ranuras), existe la posibilidad de cortocircuito.

— *Omisión de la eliminación previa de la humedad:*

Operación que debe realizarse antes de la impregnación, y no puede llevarse a cabo tras ésta. La omisión del secado previo disminuye la capacidad de aislamiento de los materiales aislantes, dando lugar incluso a cortocircuitos. Si los hilos son esmaltados, la omisión de esta operación no suele tener consecuencias graves cuando se emplean barnices sintéticos.

— *Falta de control de la viscosidad del barniz:*

La viscosidad de un barniz almacenado aumenta lentamente (por polimerización natural), pero esto no es problema si el barniz se consume dentro de su período de vida media.
Sin embargo, por almacenaje defectuoso (ver § 18), o por errores de aplicación, la viscosidad puede aumentar más de lo debido, con lo que el poder de penetración del barniz disminuye.
La viscosidad del barniz debe, pues, controlarse; si un barniz exige una exagerada adición de disolvente, probablemente es inutilizable.

— *Exceso de temperatura durante la impregnación:*

Como se ha dicho, tras el secado previo, al introducir los arrollamientos en la cuba de impregnación, hay que llevar especial cuidado de que la temperatura de los mismos no exceda de 30-40° C, salvo en algunos tipos especiales (ejemplo: el 12340 de *AISMALIBAR*). A mayores temperaturas, los disolventes tienen mayor poder de atacabilidad sobre la capa de esmalte.

— *Escurrido en malas condiciones:*

Si el escurrido es insuficiente, se produce un mal reparto de la capa de barniz y, además, es posible que se formen vapores peligrosos en el horno de secado.

— *Omisión de la fase de evaporación del disolvente:*

Si, al introducir los bobinados en la estufa, la temperatura de ésta es demasiado elevada (y no se alcanza paulatinamente), se produce un secado rápido de la superficie, con formación de una película que priva al resto del disolvente de salir al exterior.
Aunque entonces se prolongue indefinidamente el tiempo de secado, no se eliminará ya el disolvente, con lo que éste puede atacar el esmalte.

— *Secado deficiente:*

Si un barniz de impregnación no queda suficientemente seco, puede absorber la humedad, presentará baja resistencia a la acción de aceites calientes, y puede atacar el esmalte de los hilos.
Si el arrollamiento se encuentra situado en un rotor, al girar expulsará el barniz, y se producirán movimientos y roces entre las espiras.

18. Cómo manipular un barniz

— *Almacenaje:*

Los envases deben guardarse a temperatura ambiente no superior a 20° C ni inferior a 10° C.
El tiempo de almacenaje oscila según la composición del barniz. Los barnices grasos duran más (2 años, herméticamente cerrados y sin utilizar) que los barnices sintéticos (unos 6 meses, en las condiciones antedichas).

— *Dimensiones de las cubas y depósitos:*

Debe procurarse que la superficie del barniz en contacto con la atmósfera sea la mínima posible (para reducir la oxidación), especialmente en los barnices grasos.

Por ello, las cubas de impregnación deben tener dimensiones adecuadas a las piezas a sumergir, no siendo más grandes de lo estrictamente necesario.
Conviene cerrar herméticamente cubas y depósitos (cuando no se utilizan).

— *Adición de diluyente:*

El diluyente, como se ha dicho, debe dejarse caer poco a poco, sin dejar de remover el barniz, evitando las acumulaciones excesivas.
En los barnices grasos, hay que procurar agitar la masa lo menos posible (para impedir la oxidación), debiéndose, además, variar el sentido de la agitación.

— *Limpieza previa de los arrollamientos:*

Las piezas a impregnar (tanto los arrollamientos como las partes donde éstos se encuentren situados) deben estar exentas de grasas. De lo contrario, pueden ser disueltas por los disolventes, lo que retardaría considerablemente el tiempo de secado. Las grasas pueden llegar a inutilizar por completo el barniz.

— *Escurrido del barniz:*

El barniz procedente del escurrido en caliente (ver § 13), no debe mezclarse con el existente en el depósito-almacén.

— *Precauciones de seguridad personal:*

Los barnices, así como los disolventes y diluyentes, pueden ser tóxicos e inflamables.
Así, debe evitarse el contacto directo con las manos, trabajar en locales bien ventilados (¡vapores no respirables!), y mantener los líquidos lejos de toda llama.

19. Cómo controlar si se ha impregnado bien

— *Por el aspecto de la pieza impregnada:*

Un arrollamiento de color pálido y mate tras la impregnación, indica que la capa de barniz es insuficiente. En este caso, habrá que proceder a una nueva impregnación.
El defecto proviene de haber empleado un barniz de baja viscosidad, o quizá del empleo de un barniz de viscosidad correcta pero con poca concentración (ver § 11).

Un arrollamiento muy brillante, tras una sola impregnación, indica generalmente que ha sido empleado un barniz excesivamente viscoso.

— *Por medio de la sonoridad:*

En los arrollamientos pequeños, si al ser golpeados su sonoridad es perfecta (o sea, no «suena a hueco»), se puede suponer que están bien impregnados.
El método no es válido para arrollamientos voluminosos.

— *Por la medición eléctrica del aislamiento:*

Medida que puede hacerse determinando las variaciones de la resistencia entre fases, o entre los conductores y masa, durante el tratamiento de impregnación de un arrollamiento.

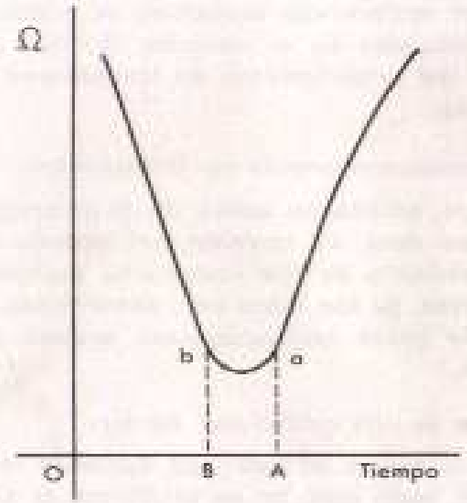


Fig. 5. — Curva de variación de la resistencia del aislamiento.

La resistencia del aislamiento decrece rápidamente durante la evaporación de los disolventes. Finalizada la evaporación, desciende todavía más la resistencia a lo largo de la oxidación-polimerización, hasta un valor mínimo, a partir del cual crece la resistencia (con una inflexión y un máximo asintótico), según expresa la figura 5.

El final del tratamiento debe estar en las proximidades del punto de inflexión.

Cuanto más elevada es la temperatura de trabajo, tanto más rápidamente tiene lugar la polimerización.

Algunos tipos de barnices sin disolvente, además de polimerizar por aporte de calor, pueden hacerlo bajo la presencia de catalizadores especiales. Así, en estos casos, si se desea, la polimerización se puede realizar a la temperatura ambiente, añadiendo el catalizador momentos antes de emplear el barniz.

13. Impregnación bajo vacío y presión

El proceso total consta de cuatro fases: Secado previo (en horno o autoclave), Impregnación bajo vacío y presión, escurrido y secado (en horno o autoclave).

— *Secado previo:*

Se realiza en horno aparte, según lo dicho en el proceso por inmersión, o mejor en autoclave.

En este último caso, se calienta el autoclave a una temperatura de 105° C, y se produce un vacío de 750 mm durante 1 hora. Se desconecta la bomba de vacío y, manteniendo éste, se dejan enfriar los arrollamientos dentro del autoclave, hasta una temperatura de 35° C.

— *Impregnación bajo vacío y presión:*

Alcanzada la temperatura de 35° C, se conecta la bomba de vacío (figura 2) hasta que se alcancen, de nuevo, los 750 mm. Se desconecta la bomba, manteniendo el vacío, y se abre paso al barniz (que pasa del depósito-almacén al autoclave) procurando que, al cubrir el barniz los arrollamientos, el vacío residual sea de 300-400 mm.

La operación dura de ½ a 1 hora, reconociendo que ha concluido cuando en la superficie del barniz dejan de aparecer burbujas de aire.

Seguidamente, se lleva el autoclave a una presión positiva de 3 a 4 atmósferas durante ½ hora.

— *Escurrido:*

Se pasa el barniz al tanque-almacén, dejando escurrir los arrollamientos durante 1 hora, a la temperatura ambiente.

Seguidamente, se eleva la temperatura a 70° C, produciendo un vacío de 200-300 mm. Esta situación se mantiene durante 1 a 4 horas, según el tamaño de las piezas impregnadas.

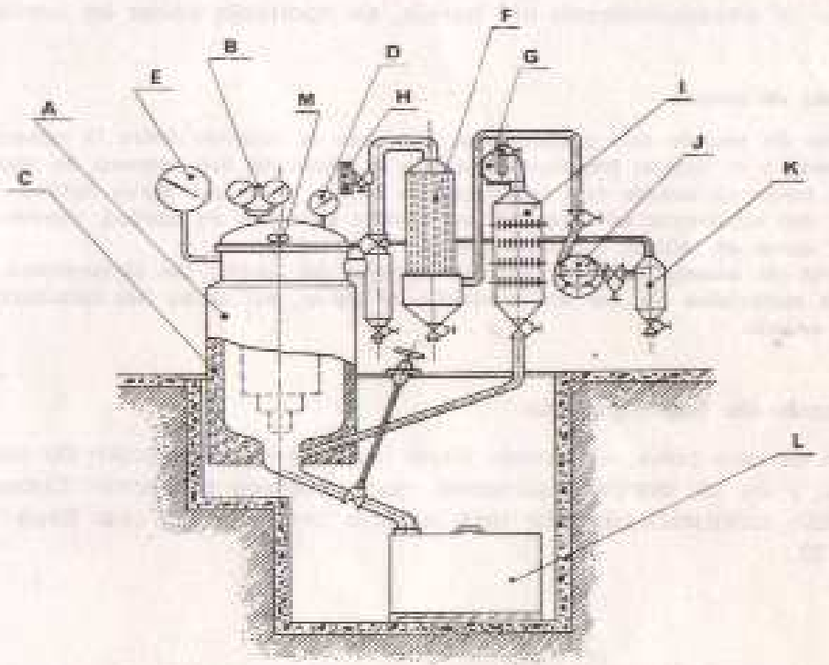


Fig. 2. — Stand de impregnación por vacío y presión (cortesía de Aismalibar):

A. Autoclave.
B. Manómetro y vacuómetro.
C. Calefacción autoclave.
D. Termostato.
E. Registro temperatura.
F. Condensador.
G. Ventilador.
H. Filtro aire.
I. Aerotermo.
J. Compresor-Bomba de vacío.
K. Separador.
L. Depósito almacén de barniz.
M. Mirilla.

Ahora se produce un nuevo escurrido, pero en caliente, no mezclando el barniz de escurrido con el del tanque-almacén.

— *Secado:*

Seguidamente, se eleva la temperatura hasta 120° C, produciendo un vacío de 400-500 mm. La temperatura se mantiene, entonces, a 120° C (o más, según las características del barniz) durante 1 hora. Transcurrido este tiempo, el vacío habrá alcanzado los 750 mm.

A continuación, se cura el arrollamiento, a la temperatura dicha, durante el tiempo que sea preciso para obtener el grado de curado deseado (tiempo y temperatura dependen de las características del barniz). Con el fin de aumentar el rendimiento de la instalación, y de evitar el envejecimiento del barniz, se aconseja secar en horno aparte.

14. Curvas de secado

Las curvas de secado son gráficos que expresan la relación entre la temperatura del arrollamiento y el tiempo transcurrido desde la iniciación del proceso de impregnación. Conviene tener en cuenta que cada tipo de barniz tiene una curva óptima de secado, de modo que solamente se alcanzan los valores máximos de calidad, siguiendo exactamente la curva de secado correspondiente.
En la curva de secado influyen también, además del barniz, las dimensiones geométricas y los materiales de los arrollamientos a tratar, así como las características del horno de secado.

15. Stands de impregnación

Constan de una cuba, en donde tiene lugar la impregnación de los arrollamientos, y de un depósito-almacén, que contiene el barniz. Cuba y depósito están comunicados por una tubería provista de una llave de paso (figura 3).

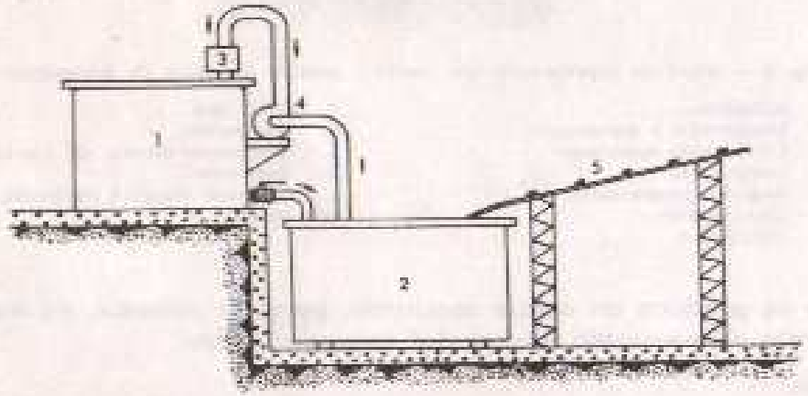


Fig. 3. — Stand de impregnación por inmersión (cortesía de Alsmalibar): 1. Depósito de barniz. 2. Cuba de impregnación. 3. Filtro. 4. Bomba. 5. Plano inclinado de escurrido.

Una vez impregnados los arrollamientos, se colocan en un escurridero inclinado que devuelve el barniz escurrido a la cuba de impregnación.

Una bomba permite pasar el barniz desde la cuba al depósito.

16. Hornos de secado

Hay diversos modelos de hornos por radiación de calor: con circulación natural de aire o con tiro forzado, provistos o no de aerotermo y refrigerante para recuperar los disolventes.

En cualquier caso, si se requiere control, todos deben estar equipados con termorregulador y termorregistrador de la temperatura.

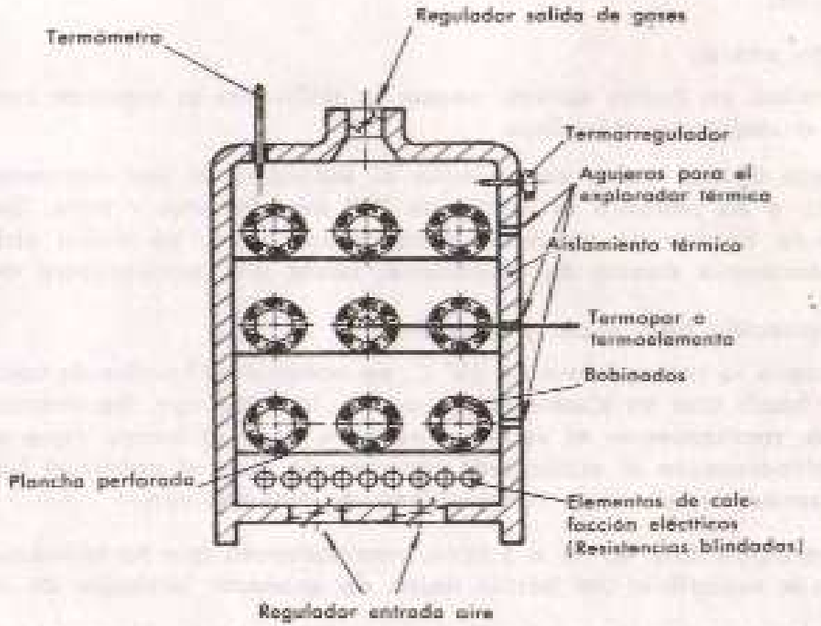


Fig. 4. Sección de un horno para secado (cortesía de Alsmalibar).

La figura 4 presenta la sección de un horno para secado, con sus diferentes elementos de control.

Tabla 3: Aplicación de aislantes Aismalibar en máquinas eléctricas rotativas

Clase térmica de la máquina	Aislantes de ranura y fase	Cuñas de cierre	Aislantes de cabeza	Aislantes y conductores para salida a bornes	Hilos para bobinados **	Barnices de impregnación	Barnices de acabado y protectores
A (105° C)	**Tela Electrisol** Resiste al agua, humedad y aceite caliente. **Prensspan Electrisol** Elevada resistencia a la rotación y doblado. **Lona Electrisol** Buena resistencia a la tracción, agua y humedad.		**Cinta Electrisol** Resiste al agua, humedad y aceite caliente.	**Cinta Electrisol** Resiste al agua, humedad y aceite caliente. **Tubo Termoflex** Elevada resistencia al calor. No contiene cloro ni halógenos. **Cables Termoflex - 105** Termoplástico especial.	**Hilos Aislados con algodón tipos A - AA - AB y AAB** Buena resistencia a la abrasión y a los disolventes. Para el bobinado de motores donde el factor espacio no sea de vital importancia. **Hilos Aislados con papel tipos P - PP - PB y PPB** Buenas propiedades dieléctricas. Nota: Si bien los tipos A - AA - P y PP son de clase térmica Y, hemos tenido en cuenta que al impregnar los motores, estos materiales alcanzan la clase A.	**N.° 30** Grasa.	**N.° 40** Muy buena rigidez dieléctrica. **N.° 77** Resiste humedad, el calor y ácidos diluidos.
E (120° C)	**Nomex** 1015 A (Papel Kraft-Poliester) 1043-A (Prensspan-Poliester). 1045-B (Prensspan-Poliester-Prensspan).	**Celtival** Resiste al alcohol, tetracloruro de carbono, percloro e hidrocarburos aromáticos. **Celotex** Muy reducida absorción por mantenimiento. Resiste al agua, aceites-grasas, ácidos y bases diluidos e hidrocarburos de carbono.		**Tubo y Cablecito Viroin - 120** No propagan la llama. Buena resistencia al aceite mineral, agua y agentes químicos.	**Hilo y Piolina Fiberlac** Excelente resistencia mecánica. Buena resistencia a los barnices de impregnación y al Freón 12.	**N.° 90** Asfáltico elastómero. Resiste acción calórica de transformador.	
B (130° C)	**Papel Aislante Fiberlac** Resiste al calor y a la humedad. **Folio Poliester** Gran resistencia al desgarre y a la tracción. **Tejido Vidrio Barnizado** Resiste a la tracción, humedad, agua y aceites. Gran resistencia a la perforación dieléctrica. **Nomex** 1015 A (Vidrio barnizado-Poliester). 1015 C (Poliester Vidrio barnizado-Poliester). 1324-B (Vidrio barnizado Aramida-Vidrio barnizado). **Micafolios Micos. 201-204-208-204** Gran calidad dieléctrica. **Micanita Flexible N.° 140** Se puede moldear en frío. **Micanita Flexible N.° 15211** Se puede moldear en frío. Sus caras están protegidas con papel para evitar desprendimientos de mica. **Micanita Flexible N.° 15544** Se puede moldear en frío. Tiene buena resistencia al ozon. Sus caras están protegidas con tejido de Vidrio barnizado.	**Vidrenax** Gran dureza y buena resistencia mecánica. Excelente resistencia a los ácidos. **Electrisol - 13** Buena resistencia mecánica, al calor, humedad y agentes atmosféricos.	**Cinta de Mica** Buena flexibilidad. Para encintar partes curvadas. Tipos: 20111 (Papel-mica-papel) (al asfalto) 20112 (Papel-mica-papel). 20112- (Seda-mica-papel) (al asfalto) 20113- (Seda-mica-papel). 20408 (Vidrio-mica). 20513 (Vidrio-mica-papel). **Cinta Vidrio-Micanita** Encintado manos voluntarios. Buenas propiedades dieléctricas. Mayor flexibilidad que la Cinta de Mica. Con soporte tejido de vidrio. Tipos: N.° 17409. N.° 17411. N.° 21409 (Negra asfáltica) N.° 21411 (Negra asfáltica).	**Cinta de Mica** Buena flexibilidad. Para encintar partes curvadas. Tipos: 20111- (Papel-mica-papel) (al asfalto) 20112- (Papel-mica-papel). 20512- (Seda-mica-papel) (al asfalto) 20113- (Seda-mica-papel). 20408- (Vidrio-mica) 20513- (Vidrio-mica-papel). **Cinta Vidrio-Micanita** Encintado manos voluntarios. Buenas propiedades dieléctricas. Mayor flexibilidad que la Cinta de Mica. Con soporte tejido de vidrio. Tipos: N.° 17409. N.° 17411. N.° 21409 (Negra asfáltica). N.° 21411 (Negra asfáltica).	**Hilo Fiberlac Barnizado** Excelente resistencia a los barnices de impregnación. Adecuado para el empleo en máquinas frigoríficas herméticas. Resiste al Freón 12 y 22.	**N.° 35** Asfáltico, amarillo. Uso general. **N.° 12100 y 14150** Para motores muy revolucionados. **N.° 12100** Sintético secado. Alta calidad. Tan económico como un barniz graso. **N.° 12340** Sintético claro. Secado seco rígido.	**N.° 12104** De acabado, secado a temperatura ambiente, particularmente empleado en determinados casos para impregnar máquinas eléctricas, cuando no se dispone de hornos. **N.° 40** De corto tiempo de secado. Para aplicaciones rápidas. **Micas. 114 y 147 (electrosumergibles)** Sellan a los poros aislantes de su aplicación. Antiácidos. Muy resistentes a la humedad.
F (155° C)	**Tejido Vidrio Poliuretanado** Fibra de vidrio impregnada con poliuretanos. **Nomex** 1001-F (Vidrio barnizado Poliester). 1324-B (Vidrio barnizado-Mezcla-Vidrio barnizado). 1733-A (Amianto barnizado-Poliester). 1704-A (Amianto barnizado-Vidrio barnizado). **Micanita Flexible N.° 448** Aglomerado con resina epoxi. **Micanita Flexible N.° 45050** Vidrio barnizado Mica Vidrio barnizado. **Micafolio N.° 484** Tejido de vidrio-mica, aglomerado con epoxi.	*** Amianex** Para piezas expuestas a elevadas temperaturas. **Electrisol - 11** Excelentes propiedades mecánicas a elevadas temperaturas.	**Cintas Vidrio Poliuretanos** Fibra de vidrio impregnada con poliuretanos. **Cinta Vidrio-Mica-Vidrio N.° 48010** **Cinta Fiotex Poliester-Mica-Fiotex Poliester N.° 48012** **Cinta Vidrio Micanita Micos. 57408-57411** Aglomerada con poliuretanos. Gran resistencia a la temperatura. **Cinta Micanita-Tureo. N.° 47417** Cinta de Vidrio Micanita aglomerada con resina epoxídica termoendurecible, que da un aislamiento continuo una vez polimerizada por el calor.	**Cablecito V - Amianex** Resiste ácidos, aceites y vapores corrosivos. Soporta elevadas temperaturas. **Cinta Vidrio Micanita Micos. 57408-57411** Aglomerada con poliuretanos. Gran resistencia a la temperatura. **Cinta Micanita-Tureo. N.° 47417** Cinta de Vidrio Micanita aglomerada con resina epoxídica termoendurecible, que da un aislamiento continuo una vez polimerizada por el calor.	**Hilo y Piolina Vidrenax F** Resiste altas temperaturas. **Hilo Terenolar** Excelente resistencia a los barnices de impregnación, ácidos débiles y al envejecimiento térmico. **Hilo y Piolina Vitrepol-F** Conductores aislados con fibra de vidrio-poliester aglomerado con un barniz adecuado. **Hilo y Piolina Amianex** Conductores cubiertos con fibra de asbesto y barniz. Buena resistencia a la compresión.	**N.° 12340** Uso universal. Para todo tipo de electromáquinas clase térmica A F (105-155° C).	
H (180° C)	**Tejido Vidrio Silicona** Elevada resistencia a la temperatura y humedad. **Micanita Flexible con Silicona N.° 640** Elevada rigidez dieléctrica. **Micanita Flexible N.° 85000** Reforzadas las caras con Vidrio-Silicona.	**Silicona** Elevada resistencia a la temperatura y humedad.	**Cinta Vidrio Virgen** Elevada conductibilidad térmica. Resiste altas temperaturas, ácidos, aceites y vapores corrosivos. **Cinta Vidrio Silicona** Elevada resistencia a la temperatura y humedad. **Cinta Vidrio Silicona** Tejido de fibra de vidrio recubierto por ambas caras con un elastómero de silicona. Gran flexibilidad. **Cinta Vidrio-Mica-Vidrio N.° 48015** **Cinta Vidrio-Mica N.° 48410** **Cinta Vidrio Micanita N.° 47411**	**Cinta Vidrio Virgen** Elevada conductibilidad térmica. Resiste altas temperaturas, ácidos, aceites y vapores corrosivos. **Cinta Vidrio Silicona** Elevada resistencia a la temperatura y humedad. **Cinta Vidrio Silicona** Tejido de fibra de vidrio recubierto por ambas caras con un elastómero de silicona. Gran flexibilidad. **Tubo Vidrio-Silicona** Buena rigidez dieléctrica. Gran flexibilidad.	**Hilo y Piolina Vidrelac - S** Elevada resistencia a la temperatura y humedad. **Termoflex 200** Mayor resistencia al envejecimiento térmico y a las sobrecargas de temperatura. Excelente resistencia a los barnices de impregnación. **Hilo y Piolina Vitrepol - S** El aislamiento posee muy buena adherencia y flexibilidad, soportando temperaturas clase térmica H.	**N.° 52** Silicónico. Insensible al agua y no le afectan las atmósferas corrosivas.	

CAPITULO II

RECEPCION, REVISION, DESMONTAJE Y TOMA DE DATOS

1. Introducción

Cuando una máquina eléctrica llega al taller para ser reparada o modificada, es preciso, con el fin de ganar tiempo y evitar errores, que todas las operaciones a realizar, desde la recepción de la máquina hasta su facturación y entrega, tengan lugar según una organización sistemática.

La serie de operaciones a realizar es siempre la misma:

— *Recepción*
— *Revisión*
— *Desmontaje*
— *Toma de datos*
— *Reparación o modificación*
— *Prueba*
— *Facturación y entrega*

Por reducido y elemental que sea un taller, cada una de las operaciones antedichas debe ser registrada. El tiempo invertido en ello resulta sobradamente compensado por la eliminación de errores, malas interpretaciones y costosas repeticiones de trabajos equivocados.

La organización de cada taller debe ser la más sencilla posible, atendiendo a sus dimensiones y condiciones; por ello mismo, no es posible dar una receta válida para cualquier taller de reparación, y será necesario, en cada caso particular, adaptar la solución más conveniente a la vista de las consideraciones generales que expresaremos en este capítulo.

2. Recepción de la máquina

En el momento de su recepción, se debe registrar la fecha de recibo, el nombre y dirección del cliente y la fecha de entrega deseada por el mismo, así como la forma de envío (correo, ferrocarril, etc.).

Respecto a la máquina, deberá anotarse en primer lugar el nombre del fabricante (o la marca), los datos que constan en la placa de características (número de fabricación de la máquina, tipo, potencia, etc.), así como hacer una lista de todos los accesorios que acompañan a la máquina (acoplamiento, polea, etc.), si los hubiera.

Registraremos, además, si se trata de una reparación o de una modificación de las características originales. En el primer caso, si el cliente conoce e indica la avería o sus efectos, convendrá apuntar dichas observaciones, que pueden suponer un considerable ahorro de tiempo en la revisión. En el caso de que hubiera que modificar las características de la máquina, se anotarán cuidadosamente las nuevas condiciones deseadas.

Todo lo expuesto puede ser escrito sobre una tarjeta que llevará un número de orden, y que para mayor comodidad puede estar impresa, con lo que solamente habrá que rellenarla.

La figura 6 muestra un modelo de tarjeta de recepción en la que pueden ser anotados cómodamente todos los datos antes mencionados. En la misma, por ejemplo, cruzando las correspondientes casillas, se ha definido que se trata de un motor trifásico; otras casillas incluyen la posibilidad de que se reciban también generadores, máquinas de corriente continua o motores universales.

La tarjeta de recepción debe ser de material resistente y las anotaciones hechas sobre ella deben ser claras e indelebles. Dicha tarjeta se unirá a la máquina correspondiente, sin equivocación, pues se comprende fácilmente el trastorno que puede ocasionar una tarjeta situada, por error, en una máquina distinta a la que corresponde.

La tarjeta de recepción debe ser unida a una parte fija de la máquina (lo mejor, al anillo de grúa o a los pies de la carcasa), por ejemplo mediante un alambre o hilos sólidos. La tarjeta debe permanecer siempre unida a la máquina, hasta el mismo momento de su despacho, excepto durante aquellas operaciones en las que corra peligro de ser destruida o deteriorada (por ejemplo, en el secado e impregnación).

Concluida la fase de recepción, la máquina, provista de su tarjeta de identidad, pasará al almacén de revisión, de donde será tomada para examinarla y decidir las siguientes operaciones a efectuar.

Fig. 6. — Modelo de tarjeta de recepción (anverso y reverso).

3. Revisión de la máquina

A menos que la dimensión del taller permita disponer de un departamento especial de revisión, ésta se efectuará en el banco de pruebas.

En el caso de tratarse de una máquina averiada, se deberá determinar la avería y su causa, así como la serie de trabajos que requiere su reparación. Para localizar las averías (cap. IV) se debe seguir un orden sistemático, a menos que la causa de la avería se localice a simple vista, sin lugar a dudas, y que sea confirmada por las pruebas.

Las conclusiones obtenidas de la revisión de la máquina, esto es, la serie de operaciones que haya que llevar a cabo, se registrarán en una tarjeta o ficha de revisión, que llevará el mismo número de orden que la tarjeta de recepción.

En el caso de que hubiera que modificar alguna o varias de las características originales de la máquina, también se determinarán las operaciones a realizar. En este caso de modificación bastará, en general, un análisis de los datos de la tarjeta de recepción para poder definir qué trabajos será necesario efectuar.

La figura 7 muestra un modelo de ficha de revisión, una vez rellenada tras el examen de una determinada máquina averiada. En la ficha constan, además de la mayoría de los datos de la tarjeta de recepción, los trabajos a realizar, definidos simplemente cruzando las casillas preparadas al efecto. Las operaciones indicadas en el ejemplo de la figura 7 son:

— *Desmontaje*
— *Limpieza*
— *Rebobinado del estator*
— *Secado y barnizado correspondiente*
— *Equilibrado del rotor*
— *Montaje*
— *Prueba*
— *Pintura*

La ficha del ejemplo está pensada para poder indicar los trabajos a realizar en la reparación o modificación de toda clase de máquinas eléctricas rotativas; así, por ejemplo, permite también anotar las operaciones a efectuar en un motor o generador de corriente continua.

Naturalmente, cada taller debe idear el tipo de ficha de revisión más adecuado, de acuerdo con sus funciones. Lo imprescindible es que todas las operaciones a efectuar puedan quedar registradas.

Al quedar anotados en la ficha de revisión todos los trabajos que la reparación o modificación de la máquina requiere, resulta que dicha ficha puede ser utilizada, si es necesario, para realizar un presupuesto aproximado. Como la fabricación en serie de las máquinas eléctricas ha abaratado mucho el precio de éstas, resulta prudente hacer un presupuesto

aproximado cuando se trata de reparar pequeñas máquinas eléctricas normales, pues podría resultar que el coste de la reparación fuera superior al precio del catálogo. Naturalmente, este no es el caso cuando se trata de máquinas eléctricas especiales.

CLIENTE ..... **Trabajo N.º** .....

MOTOR	GENER.	CONTINUA	UNIVERSAL	TRIFÁSICA	MONOFÁSICA	POLIFÁSICA	Marca:
X				X			N.º máquina:

Tensión ..... V Potencia ..... Velocidad ..... r.p.m. Frecuencia ..... Hz

Reparación

Modificación

TRABAJOS A REALIZAR

	COSTE			COSTE			COSTE	
Desmontaje		X	Cambiar colector			Caja de bornes		
Limpieza		X	Cambiar anillos roz.			Placa de bornes		
Cambiar rotor			Cambiar escobillas			Ventilador		
Cambiar estator			Cojinetes (derecha)			Condensador		
Rebobin. rotor			Cojinetes (izquierda)			Equilibrado		X
Rebobin. estator		X	Portaescobillas			Control ajustes		
Bobinar polos			Escudo (derecha)			Materiales div.		
Secado		X	Escudo (izquierda)			Montaje		X
Impregnado		X	Tapas			Ensayo		X
						Pintura		X

Fecha { Toma de datos: ..... Prevista de entrega: ..... Responsable:

En la mayoría de los casos prácticos, para poder localizar exactamente una avería, es necesario proceder a desmontar la máquina averiada. Para llevar a cabo esta operación conviene tomar una serie de precauciones, como se dirá a continuación.

DATOS DE LOS ARROLLAMIENTOS

ESTATOR — Arrollam.: a una capa — Paso: $y = 1:7$.

Por fase/polo: 1 grupo de 2 bobinas | Aislamiento ranuras:
Por bobina : 20 conductores (Serie) | Clase E, prespan 0,45 mm
Ø hilos = 1,5 esmalt /1,2 desnudo

DIMENSIONES BOBINAS (mm)

PLAN DEL ARROLLAMIENTO

CLAVE DEL PLAN: 2P-12N 3F. 025

ROTOR — Paso:

Por fase:
Por bobina: conductores ( ) | Aislamiento ranuras:
Ø hilos = aislado / desnudo
N.º ranuras = N.º delgas = N.º hilos / delga =

DIMENSIONES BOBINAS (mm)

PLAN DEL ARROLLAMIENTO

CLAVE DEL PLAN:

Fig. 7. — Modelo de ficha de revisión. Izquierda: anverso; derecha: reverso.

Si hubiera que rebobinar el estator o el rotor, es necesario tomar cuidadosamente los correspondientes datos del arrollamiento original, tanto en lo que respecta al número de conductores de las bobinas y al diámetro de dichos conductores, como a la situación de cada bobina en el arrollamiento.

Los datos así tomados deberán ser suficientes para poder repetir exactamente el arrollamiento primitivo o, en su caso, poder determinar los datos, diferentes, del nuevo arrollamiento.

Todos los datos deducidos del análisis de la máquina se anotarán en el reverso de la ficha de revisión, tal como, por ejemplo, aparecen en el modelo de la figura 7 para un caso particular.

4. Desmontaje y toma de datos

El montaje y desmontaje defectuosos de una máquina eléctrica puede traer peligrosas consecuencias, tales como deterioro de los arrollamientos, desperfectos en el eje del rotor, etc. Por esta razón, el trabajo de desmontaje (y montaje) no puede ser dejado en manos inexpertas.

En primer lugar, si ello procede, antes de empezar la operación de desmontaje habrá de ser vaciado el aceite de los cojinetes.

Si el eje llevase calada una polea, ésta habrá de ser extraída, operación que puede presentar algunas dificultades, sobre todo si hace mucho tiempo que dicha polea no se ha desmontado de la máquina.

Nunca hay que recurrir, pese a las dificultades, a métodos de viva fuerza; por tanto, no se intentará sacar la polea a base de golpear el cubo con un martillo. Toda presión radial que se ejerza sobre la polea se transmitirá al eje, con el consiguiente peligro de inutilizarlo.

Lo mejor es utilizar un mecanismo distensor, realizando la operación tal como indica la figura 8, intercalando una tuerca entre el extremo del eje de la máquina y el tornillo del mecanismo, con el fin de evitar que el rozamiento del tornillo deteriore el «punto» del eje de la máquina.

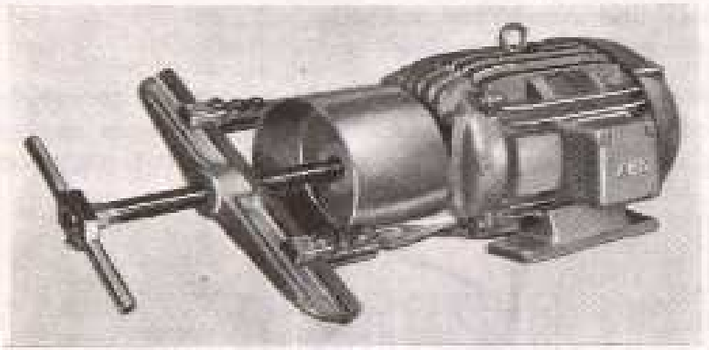


Fig. 8. — Mecanismo distensor para extraer la polea de un motor (cortesía de A.E.G., Berlín).

Evidentemente, la operación puede ser también dificultosa si el eje o la polea están oxidados. En este caso, conviene mojar las superficies con líquidos adecuados (petróleo, si no se tienen a mano otros productos comerciales más convenientes al caso), al menos durante ocho horas.

También antes de desmontar una máquina eléctrica rotativa conviene registrar la posición de los escudos frente a la carcasa, para que al ser de nuevo montados se dispongan exactamente de igual manera que vienen. Para ello basta, por ejemplo, marcar uno de sus escudos, y su correspondiente lado de la carcasa, con un ligero golpe de granete, y con dos golpes el escudo y lado de carcasa opuestos.

La extracción de escudos que llevan cojinetes de rozamiento no suele presentar dificultades. Si los escudos son de gran tamaño, cabe levantarlos roscando tornillos en los agujeros a rosca, apretándolos contra el asiento del escudo hasta que éste se alce.

Todos los cojinetes de rozamiento deben limpiarse cuando se desmonta la máquina, sumergiéndolos en petróleo o bencina hasta que no desprendan suciedad ni grasa. El aceite viejo ya habrá sido vaciado antes; el nuevo aceite, limpio, se hará correr hasta que salga con su aspecto corriente; cuando esto suceda, los cojinetes estarán en condiciones de ser montados de nuevo.

Antes de extraer escudos que llevan cojinetes de bolas, deben aflojarse primero los tornillos que sujetan las tapaderas anterior y posterior, aunque sin sacarlos por completo. Al desmontar entonces los escudos, simultáneamente saldrán el anillo exterior y la jaula del cojinete de bolas; el anillo interior quedará en el eje de la máquina, de la que habrá de sacarse con un mecanismo distensor (fig. 9).

Fig. 9. — Mecanismo distensor para extraer cojinetes de pequeños motores (cortesía de A.E.G., Berlín).

Todas las piezas de la máquina, y los accesorios que trae, que no requieran cambio o mecanización (como pueden ser, por ejemplo: los escudos, polea de transmisión, cojinetes, etc.), serán almacenados en una caja de madera, que llevará la numeración de orden de la tarjeta de recepción, de modo que no puedan extraviarse piezas, y que no exista la posibilidad de montar equivocadamente una pieza en una máquina a la que no corresponde.

Si el rotor de una máquina no requiere intervención alguna, se dispondrá junto con las otras piezas que no han de ser manipuladas. El manejo del rotor (extracción del mismo, transporte, almacenamiento, etc.), debido principalmente al eje sobre el que está montado, debe ser especialmente cuidadoso, evitando darle golpes (que podrían ocasionar una curvatura del eje); en las partes donde juegan los cojinetes, conviene arrollar unas vueltas de cinta adhesiva gruesa (por ejemplo, tesakrepp), para evitar cualquier daño en zonas tan delicadas.

Todas aquellas piezas que por su excesivo tamaño no puedan ser almacenadas en la caja (con número de orden) anteriormente mencionada, o bien aquellas piezas que deban ser apartadas para su mecanización, deberán llevar anotado el mismo número de orden de la tarjeta de recepción, para que no exista ninguna dificultad de identificación, así como para evitar el peligro de confusión con otras piezas similares.

Insistimos en que si alguno de las piezas de la máquina ofrece resistencia a ser desmontada, deben utilizarse herramientas e instrumentos adecuados, como, por ejemplo, los indicados en las figuras 8 y 9. Si es imprescindible el uso de martillos, el mazo de éstos será de goma endurecida, plástico o madera, nunca de hierro; si el mazo es de hierro, los golpes sobre la máquina deberán darse a través de tacos de madera.

Las empresas importantes, fabricantes de motores eléctricos, proporcionan instrucciones muy concretas sobre montaje y servicio de sus motores. La lámina 1 presenta un motor trifásico asincrónico en despiece.

La toma de datos del arrollamiento del estator (lo más frecuente), o del rotor, es una operación de gran importancia, puesto que de ella depende que la reparación o modificación sean correctas. Una falsa toma de datos origina, necesariamente, un rebobinado erróneo.

La toma de datos, como operación, consiste en anotar cuidadosamente todas las características necesarias del arrollamiento original de la máquina, con el fin de poder efectuar un rebobinado idéntico (en el caso de tratarse de una reparación), o para poder calcular los datos del nuevo arrollamiento de la máquina (en el caso de modificación).

La toma de datos se efectúa antes de deshacer el arrollamiento correspondiente, y también durante esta última operación. Naturalmente, antes de deshacer el arrollamiento conviene haber anotado el mayor número de datos posible; los restantes deben registrarse durante el curso de la extracción del arrollamiento original.

Los datos observados se anotarán, con letra y números bien claros, en el reverso de la ficha de revisión (fig. 7 *b*). En dicha ficha constará, pues, prácticamente, el plan del arrollamiento original de la máquina, aparte de otros datos imprescindibles.

En conjunto interesa conocer:

— *Número de polos*
— *Número de ranuras*
— *Plan del arrollamiento*
— *Conexiones del plan del arrollamiento*
— *Dimensiones de las bobinas*
— *Número de conductores de cada bobina*
— *Diámetro del hilo conductor utilizado*
— *Aislamiento de los conductores*

Además, y antes de proceder a extraer el arrollamiento original, hay que medir con cuidado la longitud máxima que las cabezas de bobina sobresalen, a cada lado, por fuera de las ranuras (fig. 10). Dicha distancia no

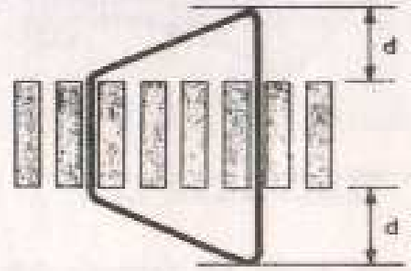


Fig. 10. — Las cabezas de bobinas sobresalen del paquete de chapas una longitud que interesa medir y anotar.

debe ser rebasada al disponer el nuevo arrollamiento, de lo contrario es posible que los escudos de la máquina presionen sobre las cabezas de las nuevas bobinas, con peligro de producir un contacto a masa.

Para anotar el plan del arrollamiento original, puede ser conveniente tener a la vista los dos o más posibles planes de arrollamiento que, para un determinado número de ranuras y polos, es posible ejecutar (ver págs. 85 y sigs.).

Sobre la determinación de las conexiones que el arrollamiento dispone, hablaremos en el epígrafe seis de este capítulo.

1.00	**Apoyo LA** (lado de accionamiento)	**	
.26	Tornillo (para sujeción de la tapa del cojinete)	DIN 931 y 933	
.30*	Tapa exterior del cojinete LA		
.34	Tornillo (para sujeción del escudo portacojinete)	DIN 931 y 933	
.40*	Escudo portacojinetes LA		
.54*	Casquillo del cojinete		
.56*	Arandela suplementaria		
.58*	Arandela elástica		
.60*	Cojinete de rodamiento LA		
.80*	Tapa interior del cojinete LA		
3.00	**Rotor completo**		
.38	Chaveta para el elemento de accionamiento	DIN 6885	
.40	Eje		
.50	Paquete del rotor		
.88	Chaveta para el ventilador (no está en la figura)	DIN 6885	
4.00	**Estator completo** (los motores de tamaños constructivos 1GS y 1ML no tienen tornillo con cáncamo)		
.04*	Carcasa del estator		
.56	Arandela de suplemento	DIN 126	
.07	Tornillo con cáncamo de elevación	DIN 580	
.20*	Placa adicional		
.50*	Paquete de chapas del estator con devanado		
.60*	Fin de la carcasa		
.61	Arandela dentada para sujeción de pie	DIN 6797	
.65	Tornillo del pie	DIN 933 y 937	

5.00	**Caja de bornes completa**	**	
.06*	Tapón de goma		
.07*	Asiento de apoyo de los bornes		
.10*	Regleta de bornes completa		
.25	Tornillo para la regleta de bornes	DIN 84	
.44*	Parte superior de la caja de bornes		
.64	Tornillo para la parte superior de la caja de bornes	DIN 84	
.66*	Tapón de cierre		
.71	Borne para puesta a tierra	DIN 46262	
.72*	Marca para el conductor de protección		
.73	Arandela elástica	DIN 127	
.74	Tornillo para la puesta a tierra	DIN 84	
.84*	Tapa de la caja de bornes		
.86	Tornillo para la tapa de la caja de bornes	DIN 91	
.88	Tornillo para la tapa de la caja de bornes	DIN 91	

6.00	**Apoyo LCA** (lado contrario al de accionamiento)	**	
.02*	Tapa interior del cojinete LCA		
.10*	Cojinete de rodamiento LCA		
.20*	Escudo portacojinetes LCA		
.50*	Casquillo del cojinete		
.64	Tornillo de sujeción del escudo portacojinetes	DIN 931 y 933	
.80*	Tapa exterior del cojinete LCA		
.88	Tornillo (para sujetar la tapa del cojinete)	DIN 931 y 933	

7.00	**Equipo completo de ventilación**	**	
.04*	Ventilador exterior		
.12	Anillo de seguridad	DIN 471	
.16*	Placa de características		
.40*	Cubierta del ventilador, completa		
.45	Tornillo para la cubierta del ventilador	DIN 933 y 931	

* Se suministra por la casa productora como pieza de recambio.

** Las piezas normalizadas señaladas con un Nº DIN se pueden adquirir en el comercio.

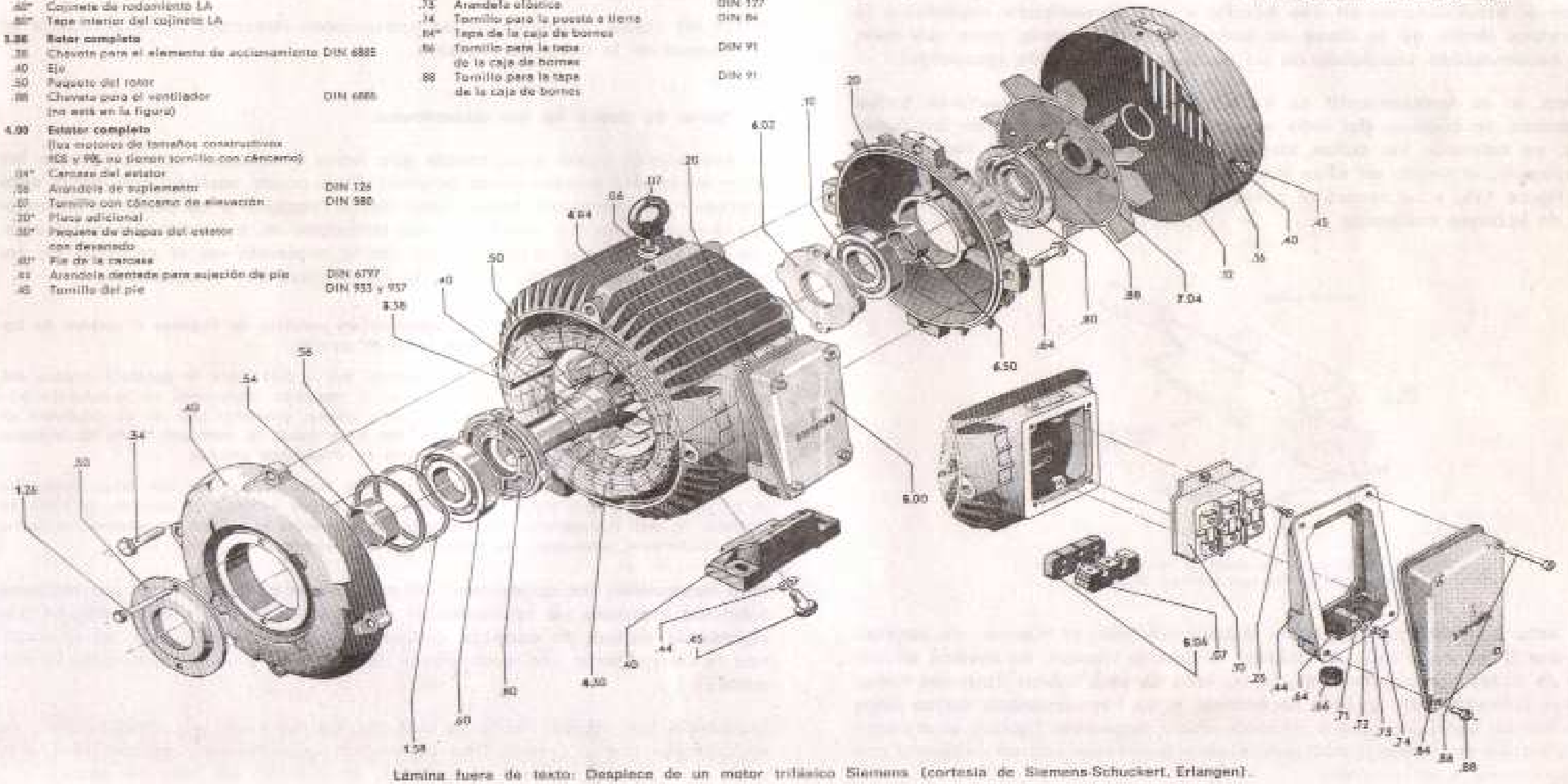


Lámina fuera de texto: Despiece de un motor trifásico Siemens (cortesía de Siemens-Schuckert, Erlangen).

5. Modo de desmontar el arrollamiento de una máquina

Por regla general, los arrollamientos de las máquinas eléctricas suelen estar tan impregnados de barniz, y éste estar tan endurecido, que resulta extremadamente difícil extraerlos sin calentarlos previamente.

Por ello, para efectuar la extracción de un modo cómodo, es conveniente calentar el arrollamiento en una estufa, a una temperatura superior a la temperatura límite de la clase de aislamiento del barniz, para que éste quede reblandecido (cuidando de no destruir la tarjeta de recepción).

Después, si el arrollamiento no ha de aprovecharse, se cortarán todas las cabezas de bobinas del lado opuesto al que se encuentran las conexiones, se retirarán las cuñas aislantes de las aberturas de las ranuras (por ejemplo, clavando en ellas los dientes de una sierra, tal como muestra la figura 11), y se sacará el resto del arrollamiento tirando de las cabezas de bobinas restantes.

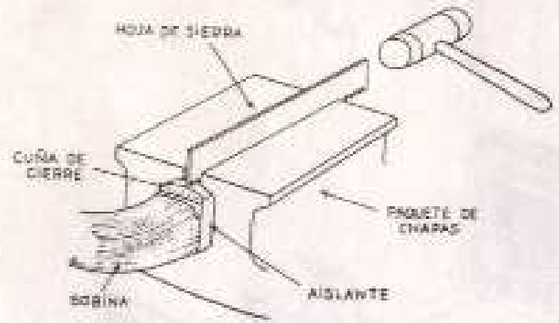


Fig. 11. — Las cuñas de cierre de ranuras se pueden extraer fácilmente con una hoja de sierra.

Es en esta fase de trabajo cuando deberá contarse el número de conductores que tiene cada lado de bobina. Al propio tiempo, se medirá el diámetro de todos los conductores de un lado de una bobina (pueden haber diversos diámetros en un lado de bobina, si se han devanado varios hilos diferentes en paralelo), tanto aislados como desnudos (quitar el aislante con un disolvente fuerte), midiendo dichos diámetros con un calibre o con un micrómetro, y anotándolos.

Como ya hemos dicho, conviene tomar nota de la forma y dimensiones de las bobinas, por lo que una de ellas, o un grupo, deberá extraerse sin deterioro.

Retirado el arrollamiento original, se procede a extraer los cajetines del aislamiento de las ranuras, tirando de ellos con unos alicates, y se toma nota del espesor, clase y dimensiones de tal aislamiento.

Todos los datos obtenidos en las operaciones descritas serán anotados en el reverso de la ficha de revisión.

6. Toma de datos de las conexiones

Es evidente la suma importancia que tiene determinar correctamente las conexiones del arrollamiento original. Para poder realizar con éxito esta operación, es necesario tener ideas claras respecto a las posibles conexiones a realizar en los arrollamientos trifásicos de las máquinas eléctricas, por lo que hay que insistir ahora en lo expuesto en el capítulo XI, así como en las tablas sistemáticas de las páginas 208 y siguientes.

Distinguiremos nuevamente entre la conexión en paralelo de bobinas o grupos de bobinas, y el devanado de bobinas con hilos en paralelo:

Cuando una bobina se ha devanado utilizando dos o más hilos en paralelo (cuyos diámetros pueden ser iguales o diferentes), se la reconoce fácilmente en la máquina porque dichos hilos entran todos en la misma ranura, mientras que si se conectan en paralelo dos bobinas o grupos, siguiendo los hilos desde la conexión hacia las bobinas, observaremos que entonces los hilos entran en diferentes ranuras.

Así, pues, se reconoce con facilidad cuándo se trata de bobinas con hilos devanados en paralelo. En lo que sigue, consideraremos que las bobinas no constan de hilos en paralelo; si, por el contrario, hubiera bobinas devanadas con hilos en paralelo, el lector podrá fácilmente establecer las correcciones pertinentes.

Para determinar las conexiones del arrollamiento trifásico de una máquina eléctrica, después de reblandecido al barniz, se cortan las ligaduras que sujetan la corona de cabezas de bobinas, y se ponen todas las conexiones al descubierto (se encontrarán todas en uno de los lados de la máquina).

Siguiendo los cables desde la caja de bornes hacia el arrollamiento, se encontrarán por lo menos tres conductores, fácilmente reconocibles, además, por su flexibilidad (aislamiento, en general, de tubo de goma).

Entonces se cuenta el número de terminales que hay conectados a cada uno de estos hilos flexibles. Si, por ejemplo, encontramos que existe un solo terminal conectado a cada hilo, se trata sin duda de una conexión en estrella-serie (fig. 12). No existe ninguna otra clase de conexión del arrollamiento trifásico en que suceda lo expuesto. Así, con sólo este dato, se habrá determinado la clase de conexión del arrollamiento analizado, y se podrá proceder a su extracción.

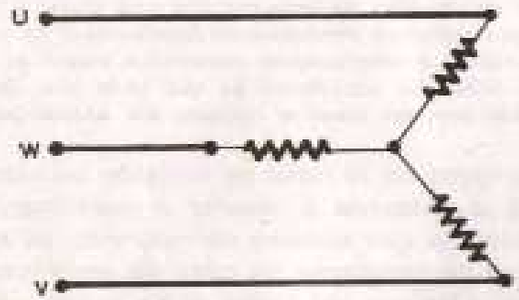


Fig. 12. — Conexión estrella serie: Un solo terminal a cada hilo.

Si, en cambio, a cada hilo flexible fueran conectados dos terminales (o sea, extremos de bobinas diferentes), la conexión del arrollamiento podría ser en triángulo-serie (fig. 13), o bien conexión en estrella-doble paralelo (fig. 14).

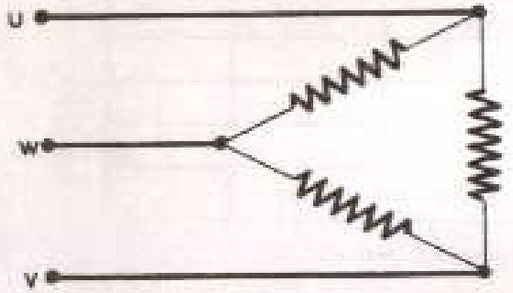


Fig. 13. — Conexión triángulo serie. Dos terminales conectados a cada hilo, pero no hay punto neutro.

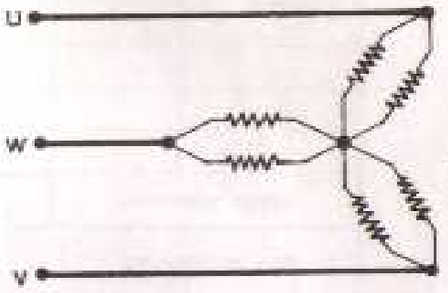


Fig. 14. — Conexión estrella doble paralelo: Dos terminales a cada hilo, y un punto neutro al que van seis terminales.

Habrá que determinar, pues, cuál de las conexiones es la del arrollamiento. Para ello buscamos el punto neutro. Si éste existe, encontraremos que tiene conectados seis terminales (fig. 14); si dicho punto no se encuentra, es que la conexión es en triángulo-serie.

Si, por ejemplo, resultara que a cada hilo flexible fueran conectados tres terminales, entonces es que se trata necesariamente de conexión en estrella-triple paralelo (fig. 15); no hay otra posibilidad de conexión diferente.

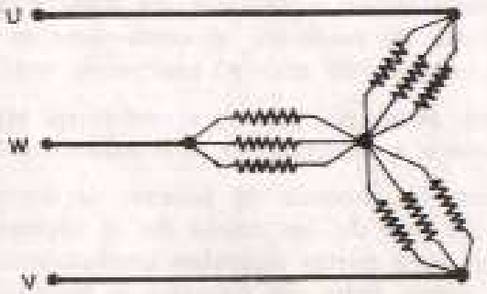


Fig. 15. — Conexión estrella triple paralelo: Tres terminales conectados a cada hilo.

Cuando a cada hilo flexible van conectados cuatro terminales, la conexión del arrollamiento podría ser en triángulo-doble paralelo (fig. 16), o bien en estrella-cuádruple paralelo (fig. 17).

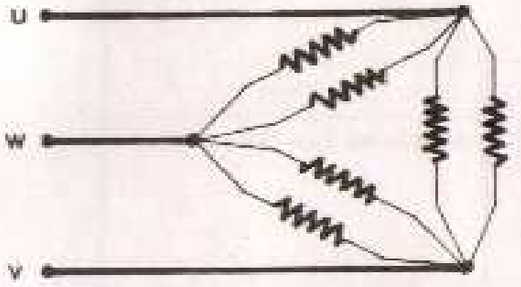


Fig. 16. — Conexión triángulo doble paralelo: Cuatro terminales conectados a cada hilo, pero no hay punto neutro.

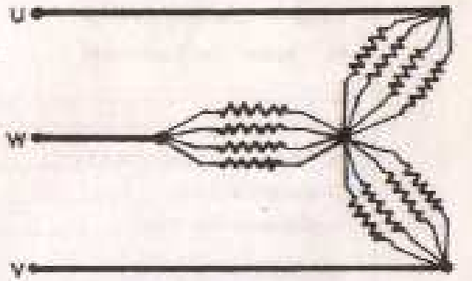


Fig. 17. — Conexión estrella cuádruple paralelo: Cuatro terminales a cada hilo, y un punto neutro al que van doce terminales.

Para determinar si se trata o no de esta última conexión, basta buscar el punto neutro; si éste existe, encontraremos que tiene conectados doce terminales; si dicho punto neutro no se encuentra, es que la conexión es en triángulo-doble paralelo.

De modo análogo al expuesto se pueden ir investigando otros tipos de conexiones, sin más que recurrir a un esquema auxiliar.

7. Boletín de trabajo

A la vista de las operaciones a realizar en cada caso, según aparecen especificadas en la ficha de revisión, el encargado de taller repartirá las órdenes de trabajo, de acuerdo con el programa más conveniente.

Cada operario recibirá, pues, un boletín u orden de trabajo donde vendrá expresada de modo claro y concreto la operación que deberá realizar.

La figura 18 representa un modelo de boletín de trabajo; la operación a ejecutar se expresa en una de las caras de la tarjeta, dando toda clase de detalles necesarios para evitar posibles confusiones; la misma tarjeta, en el reverso, sirve como ficha de tiempos y materiales, puntos ambos que es necesario anotar cuidadosamente, si se quiere tener un conocimiento bastante exacto del coste de cada operación.

Operación:	**Trabajo N.º**
Operario: Recibido: Concluido:	
Estator (polos) / rotor — Clave del plan:	
N.º total de bobinas:	
Paso:	
N.º total de hilos/bobina:	DIMENSIONES DE LAS BOBINAS
N.º hilos en paralelo:	
Diámetro hilo:	
Aislamiento hilo:	
OBSERVACIONES:	
JEFE RESPONSABLE:	

MATERIALES			**TIEMPOS**		
CARRETE	PESO	VALOR	HORAS	Ptas./hora	VALOR
N.º			Normales		
			Extra		
Costes materiales:			Costes mano de obra:		
CONTROL MATERIALES			CONTROL TIEMPOS		

Fig. 18. — Modelo de boletín de trabajo (izquierda). En su reverso: Ficha de tiempos y materiales (derecha).

Cuando un operario tenga que colocar el correspondiente arrollamiento de una máquina a reparar o modificar, deberá recibir un dibujo del plan del arrollamiento en cuestión, de modo que lo tenga siempre a la vista mientras realiza la operación, y pueda seguirlo y consultar cuanto quiera. Naturalmente, en el plan deberán venir claramente indicadas las conexiones a efectuar.

De este modo, cada taller de máquinas eléctricas debe disponer de un fichero que recoja, según determinado número de orden, toda la serie de arrollamientos que se le presenten en la práctica. Dichos planes, dibujados de modo claro y con instrucciones concretas, podrán estar clasificados de acuerdo con una clave y número (por ejemplo: 2P-72N-3F-001, podría representar un arrollamiento bipolar para 72 ranuras, trifásico, siendo 001 el número de orden), o simplemente numerados según el orden en que se han venido dibujando en el taller. Lo importante es que cada plan de arrollamiento quede clasificado y representado por una clave o número, sin posibilidad de confusión.

Como en una de las caras de la ficha de revisión se había anotado el plan del arrollamiento de la máquina a reparar o modificar, el encargado del taller deberá determinar a qué número corresponde en el fichero. Si dicho plan, o el que hubiera de arrollarse en caso de modificación, no estuviese todavía archivado en el fichero del taller, el encargado deberá preocuparse de que sea dibujado (bajo sus indicaciones y supervisión), añadiéndolo entonces a la colección.

El número o clave del plan del arrollamiento, según la clasificación del fichero, deberá acompañar a cada boletín de trabajo que esté directamente relacionado con el arrollamiento. Así, el bobinador que deba prefabricar las bobinas y grupos (esto es, devanarlas) no necesitará recibir el plan del arrollamiento correspondiente, pero sí constará en su boletín de trabajo el número de dicho plan (ver fig. 18), de modo que no quepa duda respecto a la operación que está realizando. Como se ha dicho, el operario encargado de colocar el arrollamiento en la máquina recibirá una copia del plan del arrollamiento.

En cada uno de los boletines de trabajo, como en toda la documentación que circule por el taller, deberá constar siempre el número de orden del trabajo (número idéntico al que consta en las tarjetas de recepción y revisión) que es, en definitiva, el que identifica el trabajo a realizar.

Una vez concluidas las operaciones indicadas en el correspondiente boletín, el operario devolverá dicha documentación al encargado del taller. Bajo la responsabilidad de éste queda la aceptación del trabajo realizado por el operario, así como dar el visto bueno a las anotaciones sobre materiales y tiempos.

El encargado del taller reunirá los boletines de trabajo, a medida que los recibe, con la ficha de revisión del mismo número de orden. Cuando haya recibido todos los boletines de trabajo, estarán realizadas todas las operaciones que había que ejecutar, y se podrá proceder a la facturación de la máquina. Este sistema permite, en cada momento, estar al corriente de la marcha del trabajo en cada máquina.

8. Coste total a facturar

Las informaciones facilitadas por la ficha de revisión y los boletines de trabajo, con sus correspondientes fichas de tiempos y materiales, permite calcular con suficiente exactitud el coste de la reparación o modificación y, por tanto, el precio total a facturar.

En la facturación será siempre necesario distinguir entre los costes de los materiales empleados, los de la mano de obra y los de embalajes y envío. Sin embargo, no es imprescindible citar uno por uno los trabajos llevados a cabo, ni los detalles específicos de materiales y tiempos; bastará dar una razón global de los factores antedichos, a menos que el cliente haya expresado otros deseos.

CAPITULO III

PROCESOS DEL BOBINADO DE MAQUINAS ELECTRICAS

1. Introducción

Consideraremos solamente los arrollamientos de hilos, que son los comúnmente empleados en máquinas eléctricas rotativas de pequeña y mediana potencia.

Existen diversos procedimientos para bobinar con hilos:

— Tomando el hilo del carrete que lo contiene, y devanándolo directamente en las ranuras del motor, ya sea en ranuras cerradas o en semiabiertas.

— Preparando aparte las bobinas y grupos que, una vez devanados, se insertan hilo a hilo por las aberturas de las ranuras semicerradas.

— Fabricando por completo (incluso con aislamiento) las bobinas fuera del motor y empotrándolas luego en las ranuras abiertas.

— Procedimientos totalmente automáticos.

Salvo una mención particular al proceso de bobinado automático de estatores, atenderemos exclusivamente al procedimiento citado en segundo lugar, que es el sistema más frecuentemente utilizado (por ahora) para bobinar máquinas de pequeñas y medianas dimensiones, tanto en los talleres de reparación como en las fábricas.

2. Arrollamientos insertados hilo a hilo

Como se ha dicho, este procedimiento consiste en devanar aparte las bobinas y grupos del arrollamiento, tomando después cada bobina y, primero con uno de sus dos lados, pasando todos los conductores por la abertura de la ranura que corresponda.

El proceso completo del bobinado de una máquina eléctrica haciendo uso de este procedimiento, consta de varias etapas sucesivas:

— Devanado, aparte, de todas las bobinas y grupos de que consta el arrollamiento.

— Aislamiento de las ranuras de la máquina.

— Inserción de las bobinas y grupos, colocando simultáneamente los adecuados aislamientos correspondientes.

— Verificación de las conexiones pertinentes.

— Ligadura de las cabezas de bobinas.

Concluidas estas operaciones que constituyen el proceso en sí del bobinado, resta todavía:

— Ensayo eléctrico del aislamiento.
— Impregnación y secado.

A continuación, iremos examinando cada una de las diferentes etapas mencionadas, subdividiéndolas en los procesos parciales, si los hubiera.

3. Devanado de las bobinas y grupos

Esta operación debe ser realizada por mano de obra experimentada, de lo contrario, además de que el proceso resultaría más lento, se podrían producir daños al esmalte de los hilos (por tirones bruscos, tensiones excesivas, etc.).

Existen tablas que dan los valores de las tensiones admisibles, para cada diámetro del conductor, durante el devanado de hilos de cobre esmaltado. Por encima de las tensiones límites que fijan dichas tablas, el hilo de cobre sufre esfuerzos demasiado violentos, que repercuten en roturas y en una disminución de la sección del hilo.

El operario bobinador debe recibir todos los datos necesarios para poder construir correctamente las bobinas y grupos. Como se dijo en el capítulo II, la orden llega al trabajador en un boletín de trabajo en el que constará:

— Número de bobinas simples, y número de grupos de bobinas del arrollamiento.

— Número de bobinas parciales de que consta cada grupo.

— Dimensiones geométricas de las bobinas.

— Número de espiras de cada bobina.

— Diámetros (desnudo y aislado) del hilo a utilizar.

— Clase del aislante de los hilos.

El número de bobinas y grupos, así como el número de bobinas de cada grupo, se habrán podido deducir del plan del arrollamiento (plan que no recibirá, para esta operación, el operario), y de allí se habrán anotado en el boletín de trabajo.

El número de espiras (vueltas) de cada bobina, así como el diámetro del conductor, y el aislamiento, vienen definidos por la oficina de cálculo, si la máquina es nueva, o de la toma de datos, si se tratase de una reparación. Si es el caso de una modificación de las características originales de un motor, habrán de ser determinados los nuevos datos del arrollamiento (por personal idóneo).

En cuanto a las dimensiones de las bobinas, en el caso de reparaciones se tomarán iguales a las de las bobinas originales, cuyas medidas se habrán obtenido en la toma de datos. Si se tratase de un prototipo, y se tiene el estator (o rotor) donde haya de insertarse el arrollamiento, las dimensiones de las bobinas pueden ser deducidas de las que toma un alambre recio al ser dispuesto en las ranuras del motor como si fuera una bobina. Esta operación debe ser realizada o controlada por el encargado del taller.

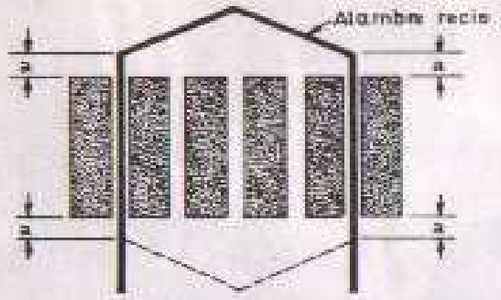


Fig. 19. — La longitud a, por fuera de las ranuras, no será inferior a 5 cm.

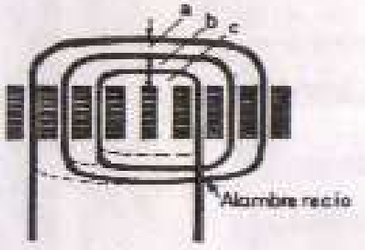


Fig. 20. — Las bobinas concéntricas se espaciarán unas distancias a, b y c suficientes.

Por fuera de las ranuras (fig. 19) deberán quedar, a cada lado, por lo menos 5 mm de lado de bobina; de lo contrario, pueden lastimarse los hilos contra el agudo canto del canal de las ranuras.

Si el arrollamiento constase de bobinas de paso variable y cabezas concéntricas, habrán de medirse — con el alambre recio — todas las bobinas diferentes de cada grupo, espaciándolas convenientemente entre sí, tal como indica la figura 20.

4. Operación del devanado de bobinas

Conocidas las dimensiones, número de espiras, de bobinas por grupo, y escogido el hilo de diámetro y aislamiento adecuados, se puede proceder al devanado de las bobinas y grupos.

En esencia, la operación consiste en arrollar el hilo conductor alrededor de una plantilla o molde (calibre de bobinar) de dimensiones adecuadas, un número de veces igual al número de espiras de la bobina a fabricar; el trabajo se realiza en el torno de bobinar.

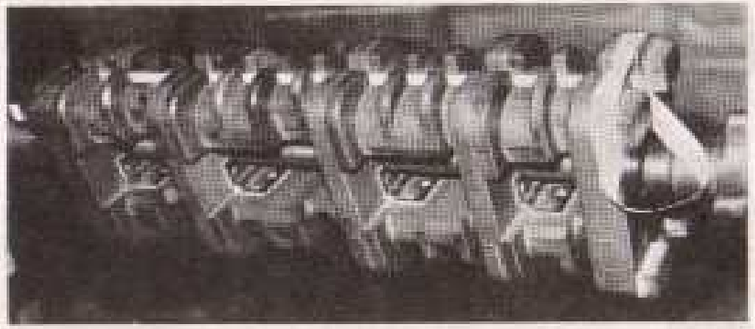
Al comienzo del empleo de los arrollamiento insertados hilo a hilo, se utilizaron sencillas plantillas de madera, a menudo simples tablillas sujetas entre sí por pernos. Naturalmente, si la fabricación (o reparación) abarca muy diferentes tipos de máquinas, resulta necesario disponer de una gran cantidad de estas plantillas, cada una con las dimensiones correspondientes a cada tipo de motor; además, la extracción de bobinas del molde, una vez se han devanado, puede consumir bastante tiempo, encareciendo la mano de obra.

En la fabricación en serie de motores, sin embargo, se utilizan todavía calibres simples de madera, pues en estos casos su empleo puede resultar rentable. Para mayor facilidad de extracción de las bobinas devanadas, los moldes pueden estar compuestos de piezas separables, o giratorias.

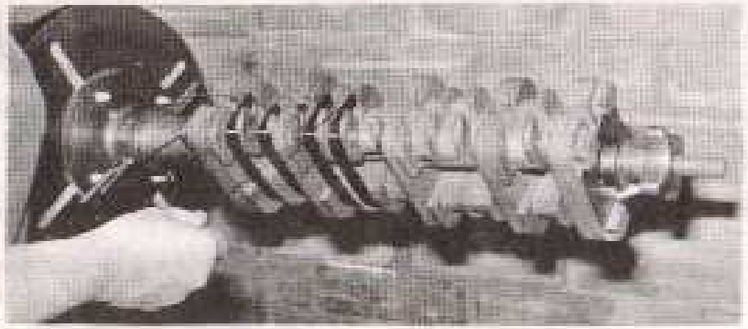
En la figura 21 aparece un conjunto de cuatro moldes calados y fijados al eje del torno de bobinar. Como puede verse en dicha figura, la parte inferior de cada molde lleva una bisagra que permite abatir esta mitad, extrayendo así cómodamente las bobinas, una vez devanadas. A lo largo del conjunto de moldes, aprovechando su ranura central, se ha colocado una cinta adhesiva que pega por su lado superior, de modo que al devanar las bobinas, las cabezas quedan pegadas a la cinta adhesiva.

La figura 22 muestra un instante del devanado de bobinas sobre el conjunto de moldes de la figura 21. En la figura 23, una vez concluida la operación del devanado, el extremo sobrante de la cinta adhesiva, que se

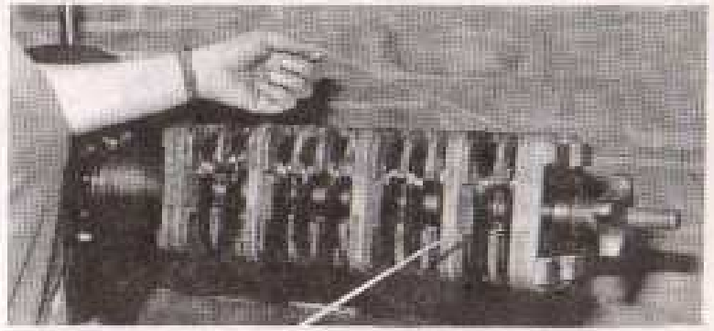
21



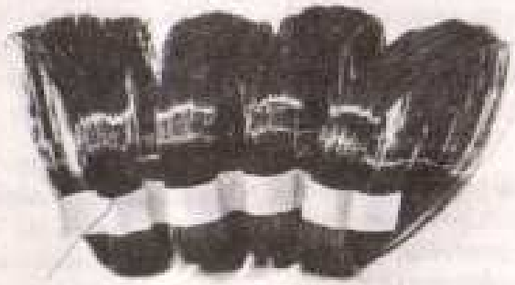
22



23



24



27

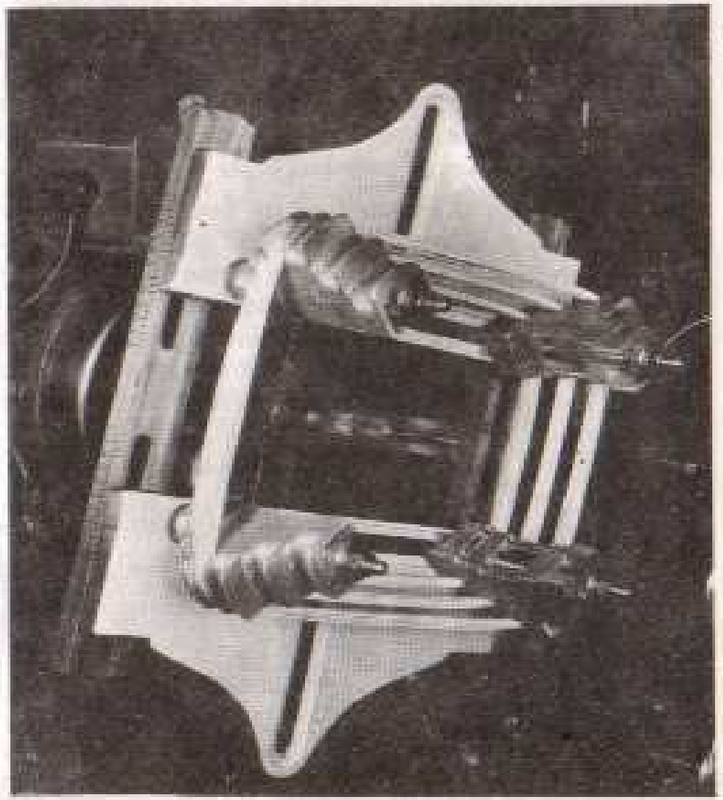


Fig. 21. — Conjunto de plantillas caladas y fijadas al eje del torno de bobinas, con la cinta adhesiva preparada para comenzar el devanado (cortesía de Asea/Ces). Fig. 22. — Un instante durante la operación del devanado de bobinas (cortesía de Asea/Ces, Sabadell). Fig. 23. — Final de la operación de devanado. La cinta adhesiva se pega sobre las cabezas de bobinas (cortesía de Asea/Ces, Sabadell). Fig. 24. — Operario extrayendo los grupos de bobinas del conjunto de moldes sobre el que se devanaron (cortesía de Asea/Ces, Sabadell). Fig. 25 (foto central) — Grupo de bobinas, sacadas del molde, sujetas por la cinta adhesiva (cortesía de Asea/Ces, Sabadell). Fig. 26. — Bastidor ajustable Rekord (cortesía de H. Schümann, Lübeck). Fig. 27. — El dispositivo Rekord provisto de guías para devanar bobinas concéntricas (cortesía de H. Schümann, Lübeck)

había dejado a propósito (fig. 21), se pega ahora sobre cada cabeza de bobina, con lo que cada una de las bobinas queda así sujetada por la cinta adhesiva.

Si no se utiliza cinta adhesiva, para que no se deshagan las bobinas al ser extraídas del molde, resulta necesario atar por lo menos uno de los lados de cada bobina.

En la figura 24 se muestra la extracción de bobinas de un conjunto análogo de moldes, mientras que la figura 25 presenta un grupo de cuatro bobinas extraídas de un molde, pudiendo verse cómo queda sujeta cada bobina mediante la cinta adhesiva.

Para evitar tener que disponer de un gran número de moldes diferentes, se desarrollaron dispositivos ajustables, tales como el de la figura 26, que está constituido por un sólido bastidor provisto de dos patines deslizantes, cada uno con una ranura en forma de T. En dichas ranuras, a las distancias (marcadas sobre el bastidor) que determinan las dimensiones de las bobinas a devanar, se alojan los pernos que soportan las guías sobre las que se arrollará el hilo.

En el mencionado dispositivo pueden ser devanadas casi todas las formas de bobinas que se necesitan en la práctica. Cuando se utilizan pernos de gran longitud, como es el caso del ejemplo de la figura 26 (que permite devanar hasta 24 bobinas en una sola fase de trabajo), es necesario afirmar los pernos por su extremo libre.

El mismo dispositivo, utilizando otras guías, permite devanar también bobinas concéntricas (fig. 27).

En la figura 28 se muestra uno de los tipos de guías ajustables (patentadas) de la casa Schümann, en las cuales se puede fácilmente establecer la distancia exigida entre las bobinas concéntricas, mediante una escala graduable.

Más moderno es el dispositivo de la figura 29, muy utilizado en la fabricación de pequeñas series de motores. El bastidor es aquí circular, lo que permite devanar a velocidades mayores que con el dispositivo de la figura 26. Su mayor ventaja, sin embargo, es que los patines son desplazables con una palanca, de modo que las bobinas devanadas pueden ser extraídas del molde mediante un simple movimiento de palanca, sin necesidad de desatornillar las guías.

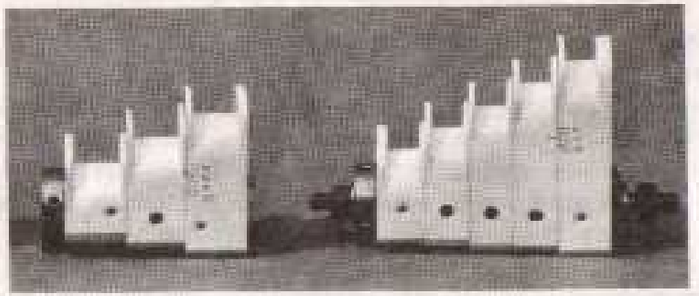


Fig. 28. — Guías graduables patentadas (cortesía de H. Schümann, Lübeck)

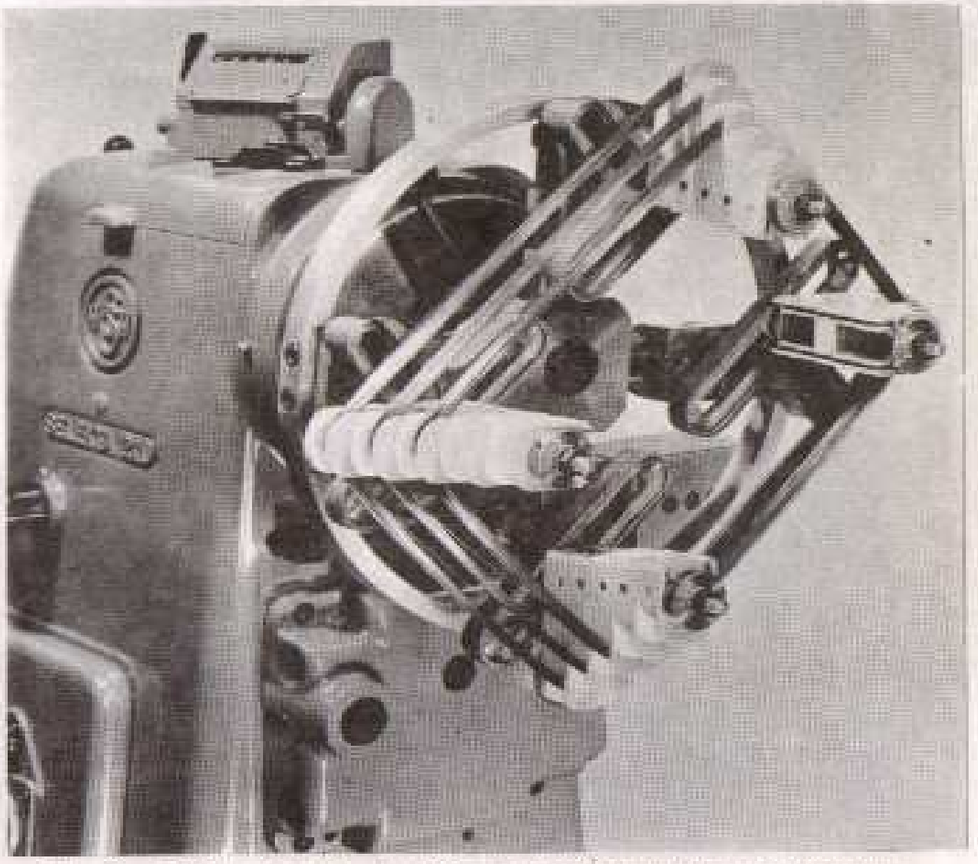


Fig. 29. — Bastidor ajustable, de Schümann. Sencilla extracción de las bobinas devanadas (cortesía de H. Schümann, Lübeck)

Por último, la figura 30 muestra un modelo frecuentemente utilizado para la fabricación en serie. El bastidor es circular, las guías — muy simples — son solamente dos, y se encuentran una frente a la otra, insertadas en pernos cuyos extremos libres se fijan con una brida de volante; éste permite la fácil y rápida extracción de las guías, gracias a una rosca plana de gran inclinación. Este dispositivo tiene la ventaja notable de que, gracias a la brida, es prácticamente imposible que las guías queden mal colocadas, siendo además su montaje cómodo y breve.

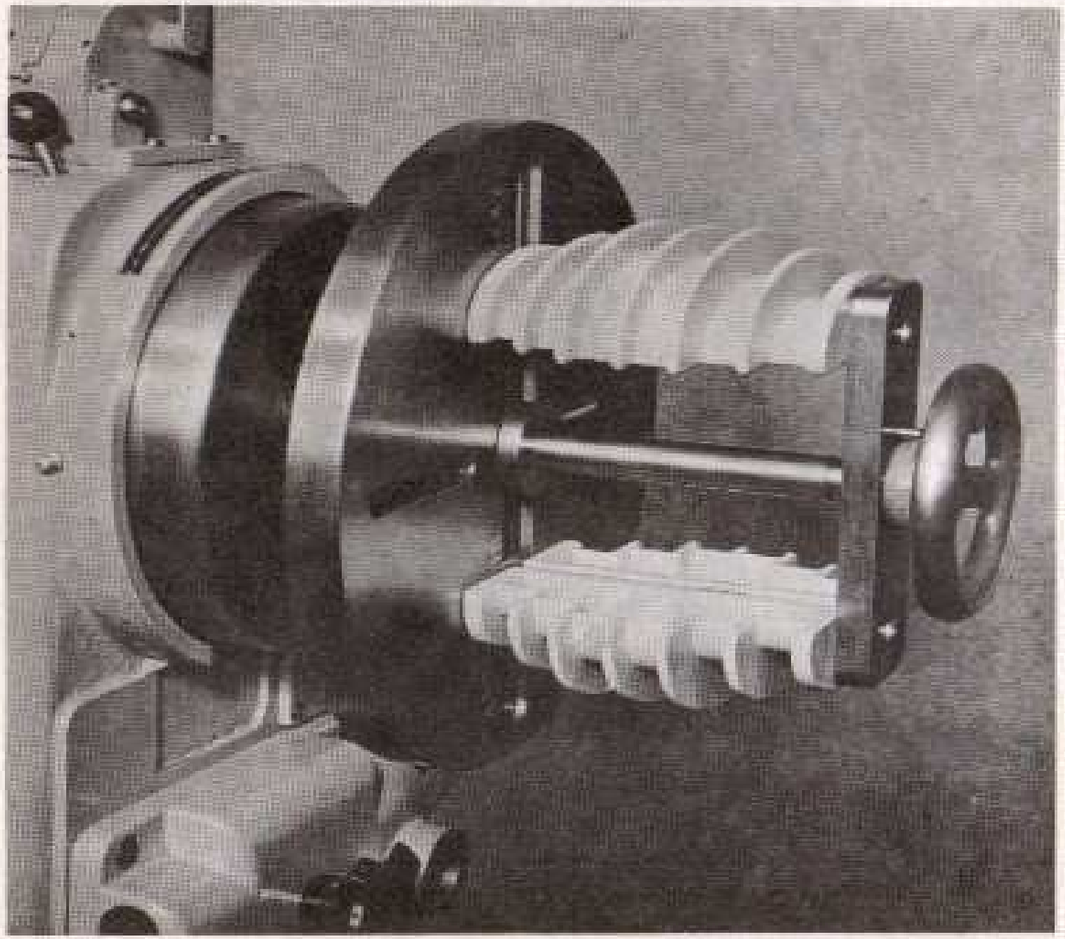


Fig. 30. — Bastidor circular, plantillas simples (cortesía de H. Schlimann, Lübeck).

5. Máquinas para devanar bobinas y grupos

El bastidor sobre el que se han dispuesto los moldes o guías de las bobinas, se ajusta sobre el plato de las máquinas de devanar. En estas condiciones, fijado el principio del hilo sobre el molde, se irán arrollando las espiras al girar el plato de la máquina devanadora.

Los tornos de devanar pueden ser manuales y en ellos el operario debe girar una manivela para ir arrollando el hilo sobre la plantilla, y simultáneamente debe tensar y guiar el hilo, procurando que los haces de conductores se formen de modo uniforme y ordenado. Un contador de vueltas le indica el número de espiras arrolladas. Concluida una bobina, se atan sus lados para evitar que pueda deshacerse, y se pasa a devanar la próxima, saltando el hilo a la siguiente guía de la plantilla, en el caso de que se trate de devanar un grupo de bobinas.

Entre el tipo más simple de máquina de devanar (como el manual expuesto), y el más complejo, existen diversos grados de automatización. Esta se ha desarrollado mucho últimamente, debido a que cada vez se exigen tiempos más reducidos para la fabricación de bobinas. De las máquinas semiautomáticas para devanar bobinas se exige hoy:

— Ajuste continuo de la velocidad, o por lo menos subdivisión de toda la gama de velocidades en escalones tan próximos como sea posible, para acomodar la velocidad del devanado al tamaño de la bobina y al diámetro del hilo.

— Arranque muy suave, para evitar la rotura del hilo, o que se produzca un excesivo alargamiento del mismo.

— Cuentaespiras incorporado, para saber el número de vueltas que se llevan devanadas, provisto de disparo automático, que detenga instantáneamente la máquina al llegar al número de espiras previamente seleccionado, bloqueándola hasta que el cuentaespiras se haya puesto a cero.

— Paro instantáneo por freno eléctrico, accionado por un pulsador o bien por el contador automático.

— Sistema conductor de hilos, para poder arrollar en la plantilla uno o más hilos, simultáneamente (por ejemplo, para devanar hilos en paralelo)

En la misma medida que aumenta la potencia de las máquinas cuyos arrollamientos hay que fabricar, y de acuerdo con la magnitud de la producción en serie, son aconsejables las máquinas devanadoras mayores y más automatizadas. Evidentemente, la decisión de adquirir una costosa máquina automática deberá responder a un consciente estudio de las necesidades de la producción.

Fig. 31. — Máquina semiautomática para devanar bobinas de tamaño reducido (cortesía de Aumann Ibérica, S. A.)

Las figuras 31 y 32 presentan modelos de máquinas semiautomáticas de tamaño mediano. La figura 33 muestra una máquina semiautomática, diseñada para fabricaciones en serie, en la cual aparece preparado el dispositivo Rekord de la figura 26; este modelo permite devanar bobinas para motores trifásicos de potencias entre los 100 W y los 100 CV. Por último,

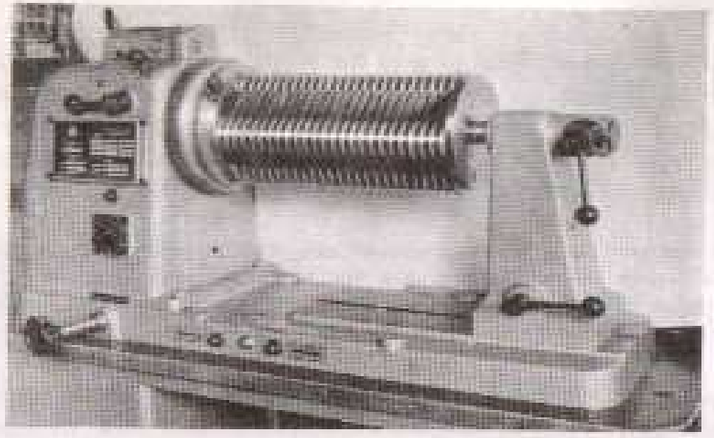


Fig. 32. — Máquina semiautomática para devanar bobinas de tamaño reducido y mediano (cortesía de H. Schümann, Lübeck).

la figura 34 muestra una máquina devanadora con gobierno electrónico totalmente automático, modelo que permite devanar bobinas de paso constante o bobinas concéntricas, sean con el mismo o con diferente número de espiras.

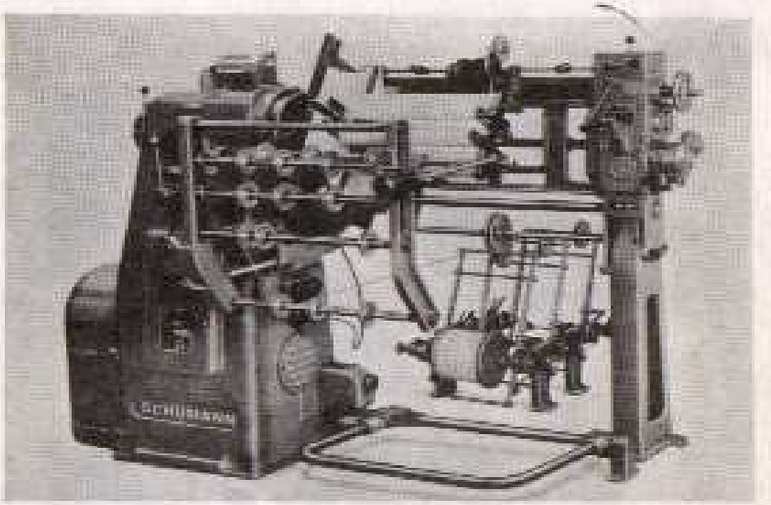


Fig. 33. — Conocida devanadora semiautomática (cortesía de H. Schümann, Lübeck).

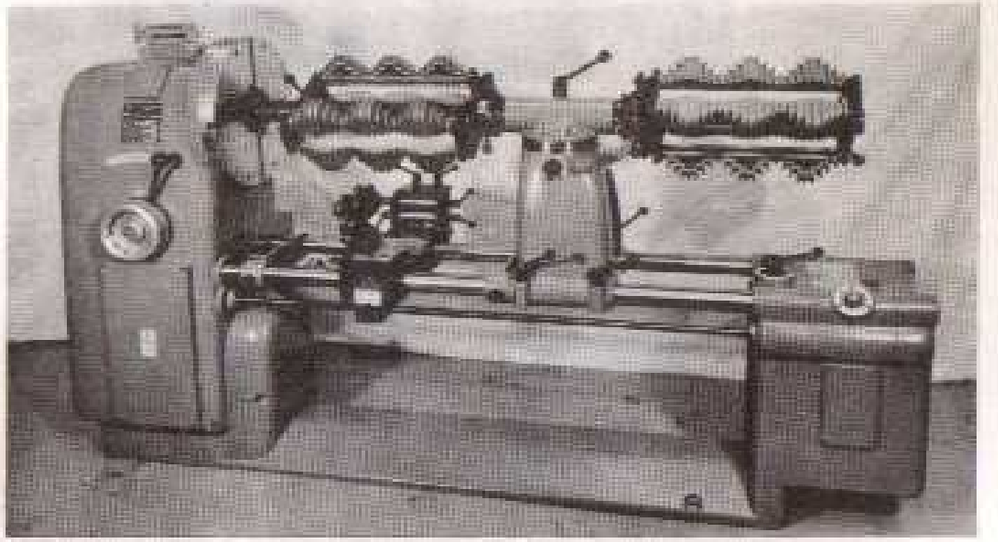


Fig. 34. — Devanadora automática electrónica (cortesía de H. Schümann, Lübeck)

Mención aparte merecen las recientes máquinas de bobinar estatores, surgidas de la creciente necesidad de reducir al máximo los tiempos de bobinado. Su empleo solamente resulta rentable cuando se trata de fabricaciones de grandes series. La figura 35 muestra el proceso del bobinado de un estator en una de estas bobinadoras automáticas; un estator bobinado por esta máquina, se presenta en la figura 36.

Fig. 35.— Máquina para el bobinado automático de estatores, vista durante su funcionamiento (cortesía de H. Schümann, Lübeck).

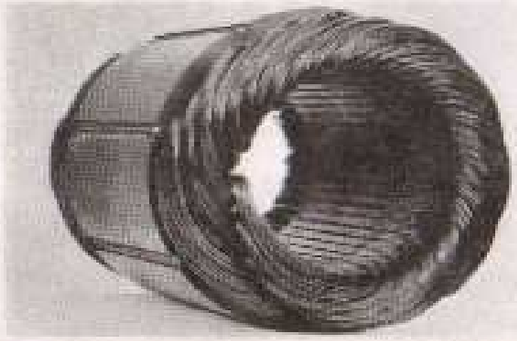


Fig. 36. — Estator bobinado por la máquina de la figura 35 (cortesía de H. Schümann, Lübeck).

6. Aislamiento de las ranuras de la máquina

Para recibir los conductores, las ranuras deben estar provistas de un aislamiento cuya clase depende de las condiciones térmicas de la máquina eléctrica (ver capítulo I).

Tratándose de arrollamientos insertados hilo a hilo, las ranuras son siempre semicerradas, aunque su forma puede ser muy variable (fig. 37).

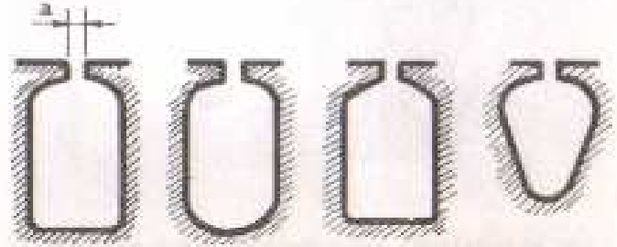


Fig. 37. — Diversas formas usuales de ranuras semicerradas.

Es evidente que la primera condición que deben cumplir estas ranuras es que su abertura *a* sea suficiente para que el hilo esmaltado pueda entrar por ella cómodamente, sin peligro de perjudicar el esmalte del hilo. Si la abertura de las ranuras es tan estrecha que no permite pasar el hilo calculado para la máquina, siempre es posible salvar la dificultad empleando hilos en paralelo.

A menudo es recomendable el uso de hilos en paralelo, incluso cuando la abertura de la ranura es suficiente (pero incómoda para pasar el hilo), pues a pesar de que si se utilizan dos hilos en paralelo hay que introducir en cada ranura doble número de espiras, resulta frecuentemente más rápida la operación, por la facilidad de inserción de los hilos.

Para saber el número total de conductores que irán en cada ranura, recordaremos que en los arrollamientos a una capa, todos los conductores de un lado de bobina tienen que ser insertados en una ranura; en los arrollamientos a dos capas, cada ranura alberga los conductores de dos lados de bobinas.

Una interesante comprobación para el bobinador consiste en cortar del hilo que hay que arrollar, un número de conductores rectilíneos igual al que llevará cada ranura, e insertarlos (frontalmente) en una de ellas, antes de que se haya puesto su aislamiento. Los hilos deberán poder

entrar en la ranura sin dificultad, ya que todavía resta por colocar el aislamiento de la ranura.

Si los hilos entrasen en la ranura muy apretadamente (o si no entran, con mayor razón), el operario lo notificará al encargado de taller, antes de devanar las bobinas y grupos, pues puede haber un error de cálculo.

Del mayor o menor juego del haz de hilos del ensayo dentro de la ranura, se puede deducir la mayor o menor comodidad (y por tanto rapidez) con que los lados de bobinas del arrollamiento se podrán insertar después.

Antes de disponer los aislantes de ranura, se suelen limar un tanto las aristas y las esquinas de todas las ranuras, a fin de preservar al hilo esmaltado de posibles roces peligrosos. El inconveniente de esta operación es que con ella se pueden aumentar las pérdidas (en el hierro) de la máquina en funcionamiento (por corrientes parásitas), por lo cual no habrá que extremar nunca el limado (ver § 8).

Una vez limados todos los cantos agudos de las ranuras, se limpian bien éstas, alejando de ellas todo polvo o esquirla de chapa; después, se puede proceder a colocar el aislamiento de las ranuras.

En general, el aislamiento para ranuras está constituido por materiales compuestos laminares (ver cap. I) que se almacenan en el taller en forma de rollos o grandes láminas. De estas láminas o rollos se recortan los cajetines de las ranuras, a las medidas convenientes, con una cizalla.

Las dimensiones correctas de los cajetines se deducen de las correspondientes de las ranuras y del ancho del paquete de chapas, lo que puede hacerse cómodamente con un patrón de papel recio o cartulina. Cada cajetín debe sobresalir del paquete de chapas, por cada lado, no menos de 3 mm.

El plegado de cada rectángulo del material aislante, para dar a la lámina aislante la forma de cajetín, se puede hacer manualmente o, mejor, a máquina (fig. 38), de tal modo que se acomode a la forma de la ranura.

En algunos talleres, se da un pliegue a cada lado del cajetín aislante (figura 41), para reforzarlo en su extremo, para evitar roces con los hilos esmaltados y, sobre todo, para impedir que pueda deslizarse hacia uno u otro lado del paquete de chapas. Este sistema es conveniente, pero retrasa la operación; a menudo se prescinde de ello, y se procura trabajar con cuidado, evitando o corrigiendo el posible deslizamiento de los cajetines.

En los arrollamientos a una capa (o sea, con un solo lado de bobina por ranura), una vez dispuestos los cajetines en todas las ranuras, se insertan ordenadamente todas las bobinas y grupos, de acuerdo con el plan del arrollamiento. Concluida esta operación, se dispone otro cajetín (de lados más cortos) de tal modo que cierre la ranura y abrace los conductores; por último, una cuña aislante asegura la inmovilidad de los conductores.

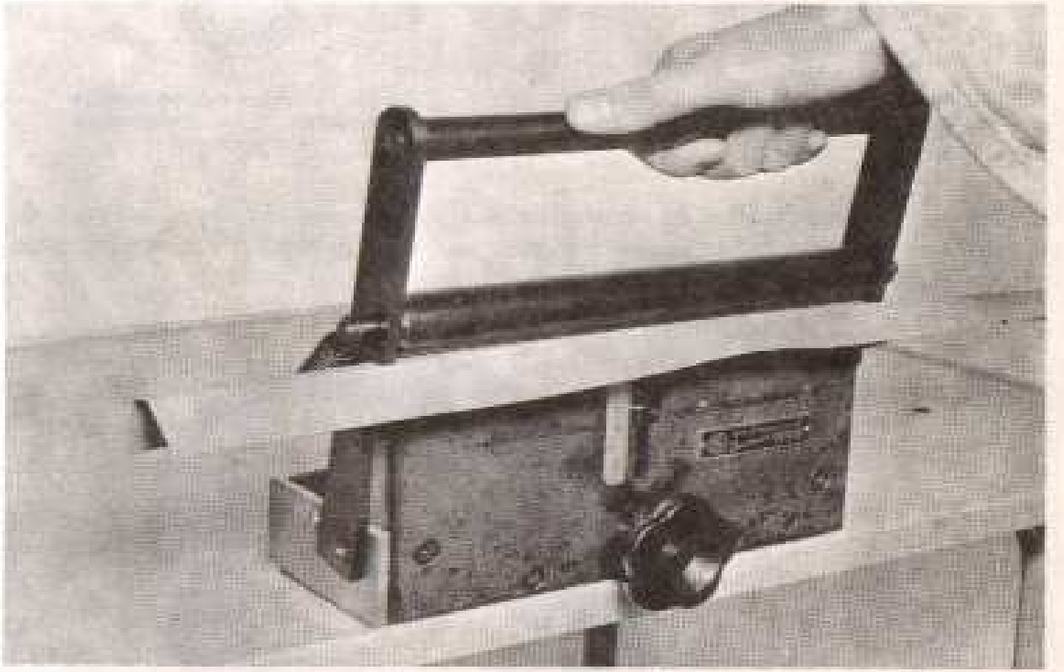


Fig. 38. — Aparato manual Isaknick, de Schümann, para plegar cajetines aislantes de ranuras (cortesía de H. Schümann, Lübeck).

En los rotores, sobre todo, hay que asegurar bien el cierre de las ranuras, ya que al girar la máquina, la fuerza centrífuga tiende a hacer salir los conductores de las ranuras.

La figura 39 representa la disposición de los aislantes de ranura y de los conductores en una ranura de un arrollamiento a una capa. La figura 40 muestra una ranura con aislantes y conductores, tal como resulta en los arrollamientos a dos capas. Los conductores de la capa inferior deben

quedar bien aislados de los de la capa superior, de modo que el cajetín intermedio debe abrazar bien los conductores de la capa inferior, sin dejar que ninguno pase arriba.

Fig. 39. — Ranura con aislantes y conductores, en un arrollamiento a una capa.

Fig. 40. — Ranura con aislantes y conductores, en un arrollamiento a dos capas.

No debe menospreciarse la importancia del aislamiento de las ranuras, ya que de su eficacia depende en gran parte el correcto funcionamiento y larga duración de la máquina.

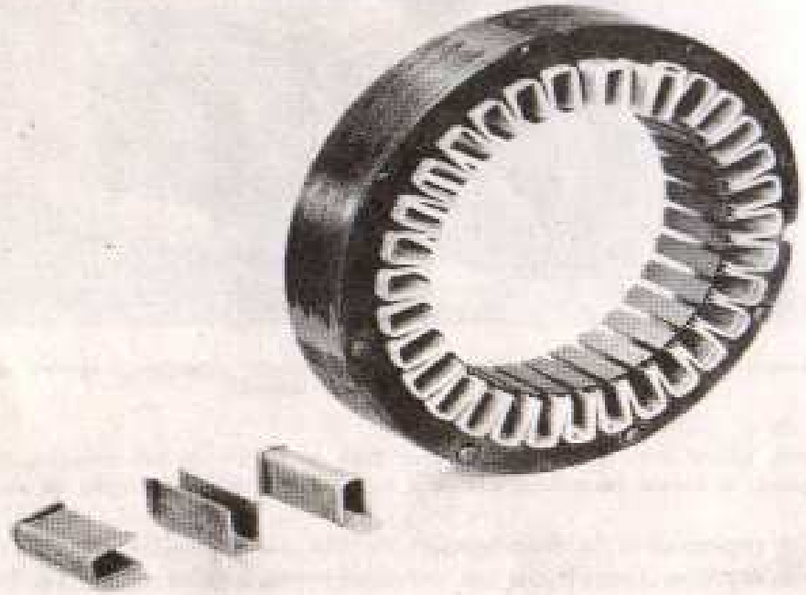


Fig. 41. — Estator preparado automáticamente para recibir el arrollamiento (cortesía de A. H. Schütte, Barcelona).

La operación de disponer el aislamiento de las ranuras se ha automatizado también en los últimos tiempos. Hoy existen máquinas que realizan estas operaciones. La figura 41 muestra un estator preparado para recibir el arrollamiento (a una capa): los cajetines de las ranuras se han cortado, plegado e insertado automáticamente.

7. Factor de aprovechamiento de la ranura

Está comprobado por la práctica que se aprovecha mejor una ranura — esto es, cabe más cobre — si se rellena con hilos de pequeño diámetro que si se insertan hilos de diámetros grandes. Esto es razonable, pues los hilos de gran diámetro dejan entre sí espacios inútiles.

Sucede asimismo que ciertas formas de ranuras admiten mayor número de conductores que otras, aunque tengan las mismas superficies. También se puede comprender, porque los hilos pueden acomodarse mejor a unas formas de ranuras que a otras.

Los talleres de bobinado pueden tener en cuenta las consideraciones anteriores mediante la anotación del llamado factor de aprovechamiento (o de utilización) de la ranura. Se puede definir dicho factor por el cociente de la sección total de los conductores de la ranura (incluido el aislamiento de los hilos), y la sección de la ranura, valor que se expresa en tanto por ciento:

$$\text{Factor aprov. ranura} = \frac{\text{Sección total conduct. (con aislam.)}}{\text{Sección de la ranura}} \cdot 100\ \%$$

Ejemplo:

Sea una ranura cuya sección es de 250 mm², que alberga 36 conductores cuyo diámetro, con el aislante, es de 2 mm.

La sección total de los conductores, contando el aislante, será igual al número de conductores multiplicado por la sección de un conductor aislado. La sección correspondiente a un diámetro de 2 mm es 3,142 mm², de modo que la sección total será:

$$\text{Sección total conduct. (con aislam.)} = 36 \times 3{,}142 = 113{,}112.$$

Así, el factor de aprovechamiento de la ranura es:

$$\text{Factor aprov. ranura} = 113{,}112 \times 100/250 = 45{,}2\ \%.$$

Si se toma nota de cada uno de los factores de aprovechamiento de la ranura para cada forma y dimensiones de las ranuras que se presentan en

la práctica, así como se apunta cada vez el diámetro de los hilos empleados, cada taller de bobinado puede reunir una serie de valores de los factores de aprovechamiento que le servirán de orientación en futuras ejecuciones.

Por ejemplo, se podrá saber *a priori* si una ranura podrá contener los hilos previstos, y — en caso afirmativo — si deberán ir muy apretados, o irán cómodamente (cuestión que influye mucho sobre los tiempos de inserción de las bobinas).

Se podrá también decidir la conveniencia de tomar hilos en paralelo, ya que entonces — al disminuir el diámetro de los hilos — quizá se puede aceptar trabajar con mayores valores del factor de aprovechamiento de las ranuras.

Evidentemente, para poder comparar entre sí valores del factor de aprovechamiento, además de tener en cuenta el diámetro de los hilos y la forma de la ranura, es preciso atender a si se trata de arrollamientos a una o a dos capas (estos últimos llevan un aislante intermedio, por lo que — en ellos — el factor de aprovechamiento de la ranura tiene valores más bajos) y, también, si los aislamientos de ranura tienen el mismo espesor.

8. Inserción de las bobinas y grupos

Las bobinas y grupos, una vez devanados, se almacenan convenientemente (siempre con el correspondiente número clave del boletín de trabajo) hasta que llegue el turno de insertarlos en la máquina.

Antes de comenzar esta operación, es necesario eliminar el esmalte de los extremos de cada bobina y de cada grupo, para que — concluido de insertar el arrollamiento — pueda procederse a ejecutar las conexiones entre bobinas y grupos.

Para pelar los principios y finales de bobinas y grupos, existen máquinas sencillas que, en esencia, consisten en dos ruedas de cepillar que arañan el esmalte de los terminales al introducir éstos entre las ruedas.

El único cuidado que requiere la operación es el de sujetar bien las bobinas, para que no sean arrastradas por los cepillos giratorios, de modo que solamente se pele la longitud necesaria (unos 2 cm).

Naturalmente, los terminales de las bobinas y grupos deberán ser suficientemente largos para que los extremos pelados queden siempre por fuera de las ranuras.

Sobre la operación misma de inserción del arrollamiento, que requiere destreza y experiencia, solamente cabe dar aquí algunas indicaciones.

El cordel, alambre o cinta adhesiva que sujeta cada lado de bobina para que no se deshaga, debe cortarse (con cuidado de no dañar los conductores) o despegarse en el momento mismo de comenzar a insertar los hilos del lado de bobina en cuestión. Si lo que se han sujetado son las cabezas de bobinas, entonces no es necesario deshacer esta sujeción.

Preparadas así las bobinas y grupos del arrollamiento, y una vez dispuesto el cajetín inicial en todas las ranuras, se puede proceder a la inserción de las bobinas en las ranuras del rotor o del estator.

La inserción del manojo de conductores que forman cada lado de bobina, puede facilitarse mediante la disposición de un «calzador» en las ranuras (figura 42). Dicho calzador, de papel (presspan) satinado, impedirá el roce de los hilos esmaltados con las aristas y cantos agudos de las ranuras (que, en este caso no será necesario limar), mientras que la superficie satinada hará que los conductores resbalen y penetren fácilmente

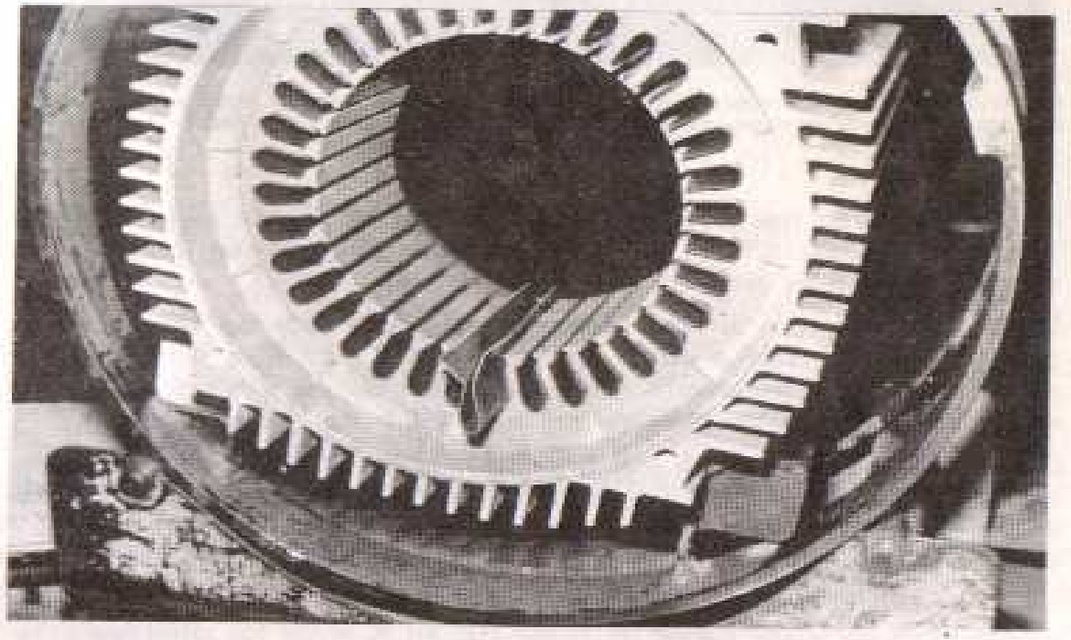


Fig. 42. — Calzador para facilitar la inserción de los lados de bobinas en las ranuras (cortesía de Asea/Cea, Sabadell).

en la ranura. Si, además, durante el proceso del devanado de las bobinas, se han mojado los conductores con aceite de parafina (fig. 43), todavía resultará más cómoda su introducción en la ranura con ayuda del calzador. Este puede quedar en la máquina como un aislante adicional, en cuyo

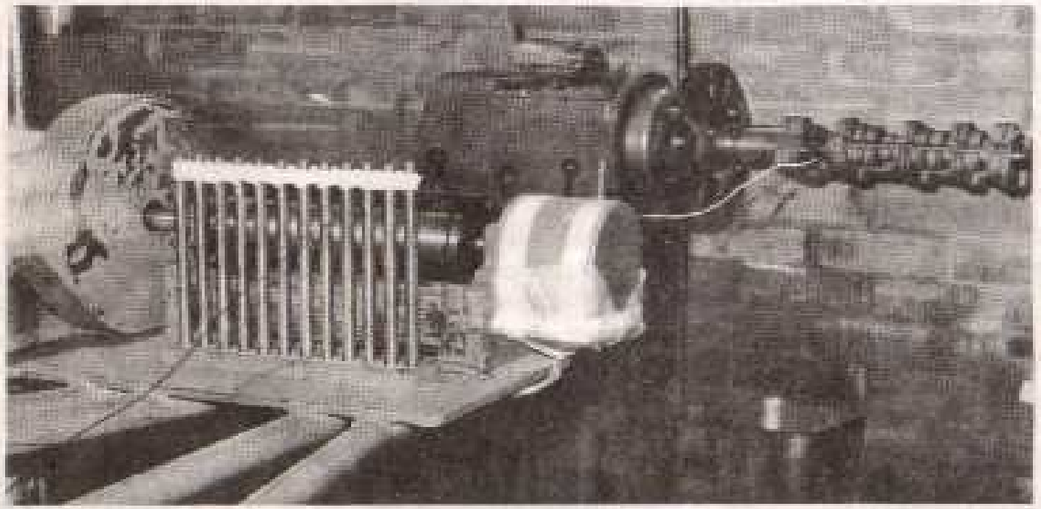


Fig. 43. — El hilo que se devana, al pasar del carrete al torno de bobinar, corre sobre un cilindro mojado en aceite de parafina. Los hilos, lubricados, resbalan mejor por el calzador (cortesía de Asea/Ces, Sabadell).

caso se cortarán los extremos sobrantes (fig. 44) y se plegarán hacia dentro los finales; o bien, si no hay suficiente espacio en la ranura, se extraerá el calzador por el frente de la máquina.

Dentro de cada ranura, los conductores de cada lado de bobina deben quedar paralelos unos a otros, sin entrecruzarse. Lo ideal sería que los conductores quedasen dentro de la ranura en la misma situación que se encuentran en el molde después de devanada la bobina en el torno.

En los casos en los que las ranuras están muy llenas, puede facilitarse la inserción de los conductores que resten de introducir, mediante la ayuda de asentadores, cuidando de no pellizcar con ellos los hilos que ya contiene la ranura.

En los arrollamientos a dos capas (y en los mixtos), no se pueden insertar los hilos de la capa superior hasta que no lo están los correspondientes de la capa inferior, y se ha dispuesto el aislante intermedio.

Las cabezas de bobinas se irán acomodando a las limitaciones del espacio disponible, así como a la forma prevista para el arrollamiento. Si es necesario el uso de martillos (de mazo de plástico o goma dura), se golpearán las cabezas de bobinas a través de piezas intermedias adecuadas (cuñas de madera, o de fibra), y no directamente sobre los hilos (fig. 45).

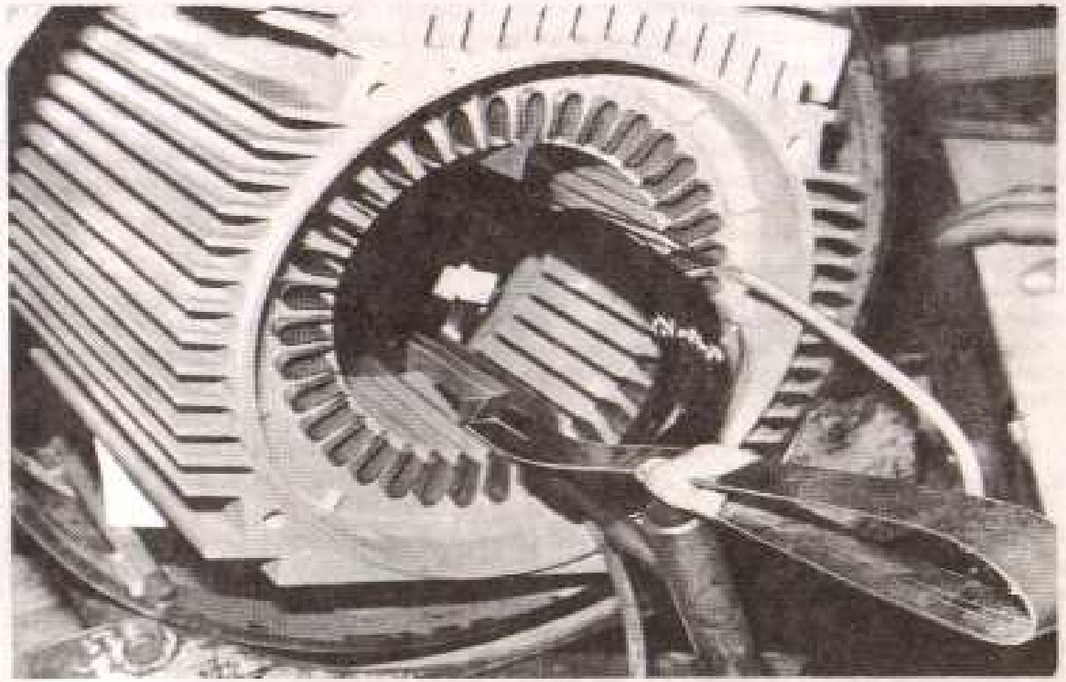


Fig. 44. — Introducida una aguja en la ranura, para evitar que puedan salirse los conductores, el sobrante del calzador se corta con una cuchilla apropiada (cortesía de Asea/Ces, Sabadell).

En los arrollamientos de hilos esmaltados no se presentarán problemas de disposición de las cabezas de bobinas, salvo que por error de proyecto (cálculo) no exista espacio suficiente para las mismas.

Es necesaria una estrecha colaboración entre el departamento de cálculo y el taller de ejecución. Resulta frecuentemente muy complicado para el calculista estar al corriente de las necesidades y conveniencias del taller, por lo que puede ocurrir que se proyecten arrollamientos inadecuados a los útiles (moldes y plantillas) del taller. El maestro de taller, al corriente de estos importantes detalles, debería poder modificar el arrollamiento no apropiado previsto, adaptándolo a los calibres de que dispone, siempre que ello no suponga una modificación de las características eléctricas de la máquina.

Así, por ejemplo, ya hemos visto que — manteniendo constantes los lados de bobina de cada fase en su correspondiente ranura — cabe construir arrollamientos a una capa con cabezas de bobinas diferentes (en dos planos, en tres planos, concéntricas, iguales, etc.).

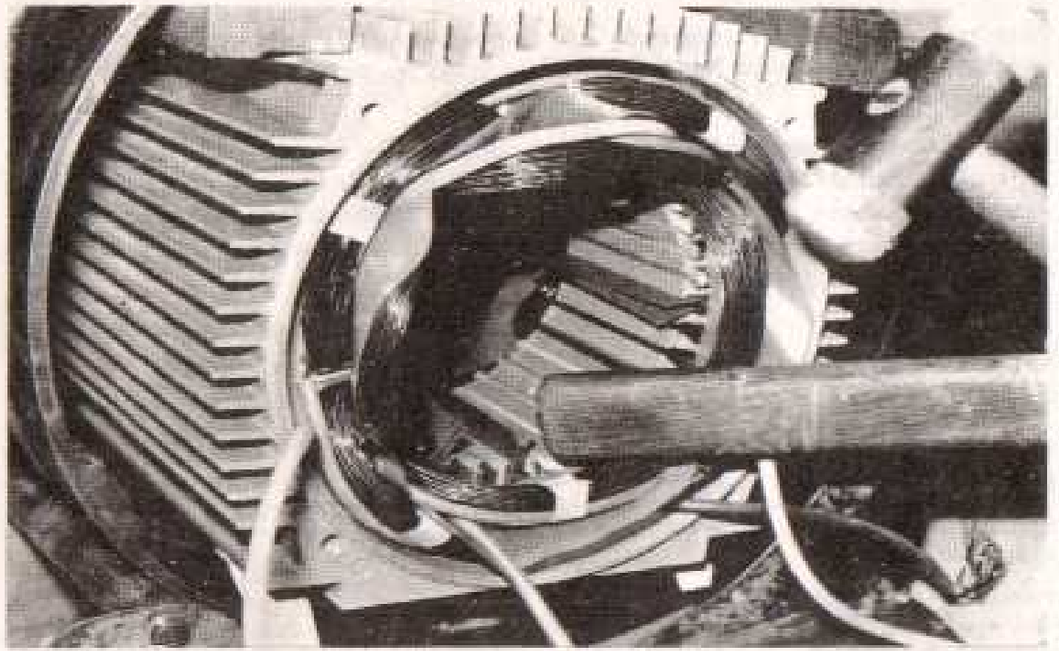


Fig. 45. — Durante la inserción de las bobinas y grupos, se van acomodando las cabezas de bobinas al espacio disponible en la máquina (cortesía de Asea/Ces, Sabadell).

Siempre que se mantenga constante el número de conductores por fase, el diámetro útil de los conductores, la situación de los lados de bobinas de cada fase, y el paso del devanado, el maestro de taller escogerá el arrollamiento más conveniente a las condiciones del taller. En cualquier caso, antes de introducir variaciones, siempre convendrá consultar a la oficina de cálculo.

9. Aislamiento entre fases

Durante el proceso de inserción del arrollamiento en la máquina, antes de llevar las cabezas de bobinas a su posición definitiva, se van disponiendo los aislamientos que separan entre sí los grupos de bobinas correspondientes a las diferentes fases.

El material de los aislamientos entre fases depende de la clase de aislamiento de la máquina (ver cap. I). Se utilizan, en general, compuestos laminares (folios u hojas) a los que se les da la forma conveniente, ya sea cortándolos con troqueles (fig. 46), como en la fabricación en serie, o bien con tijeras o cizallas.

Si el arrollamiento se ejecuta en varios planos, y se insertan primero todas las bobinas de una misma fase, se deberán disponer después los aislamientos que separarán las bobinas de esta fase de las de la segunda fase, y colocadas las bobinas de la segunda fase, se dispondrán los aislamientos que separarán la tercera fase de la segunda (fig. 47).

Fig. 46. — Ejemplo de un aislamiento entre fases cortado a troquel (cortesía de Asea/Ces, Sabadell).

Cuando las bobinas se yuxtaponen, en cada cruzamiento de bobinas será necesario intercalar aislantes, de modo semejante al que muestran las

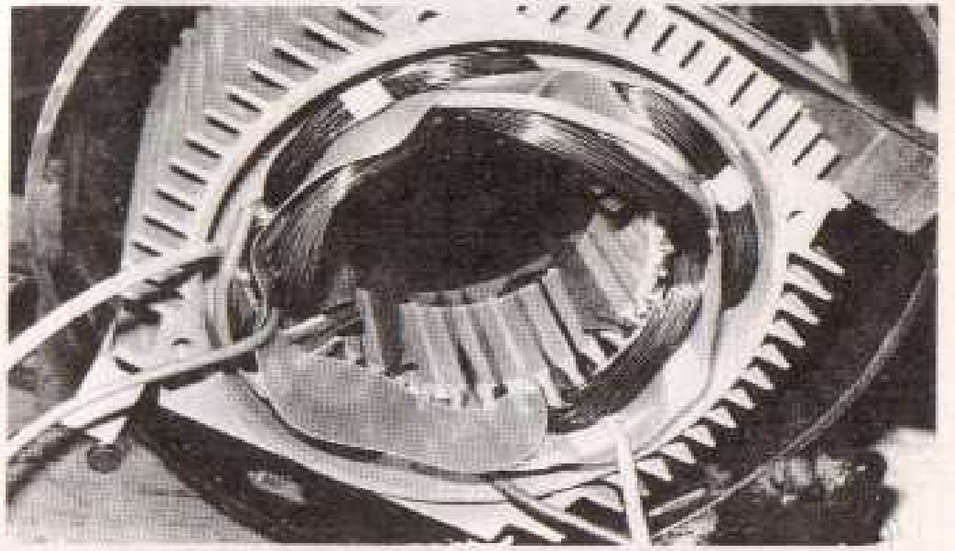


Fig. 47. — Aislamientos entre fases cuando el arrollamiento se dispone en planos superpuestos (cortesía de Asea/Ces, Sabadell).

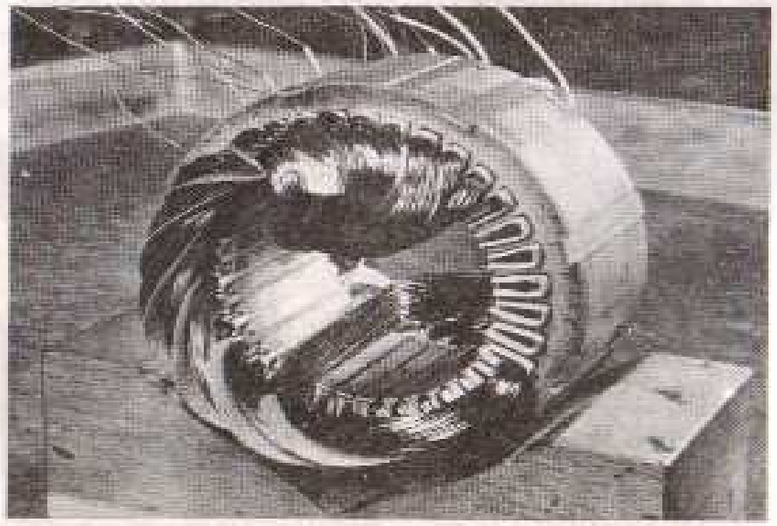


Fig. 48. — Aislamientos entre fases durante la inserción de un arrollamiento a dos capas, con bobinas concéntricas (cortesía de Siemens-Schuckert, Erlangen).

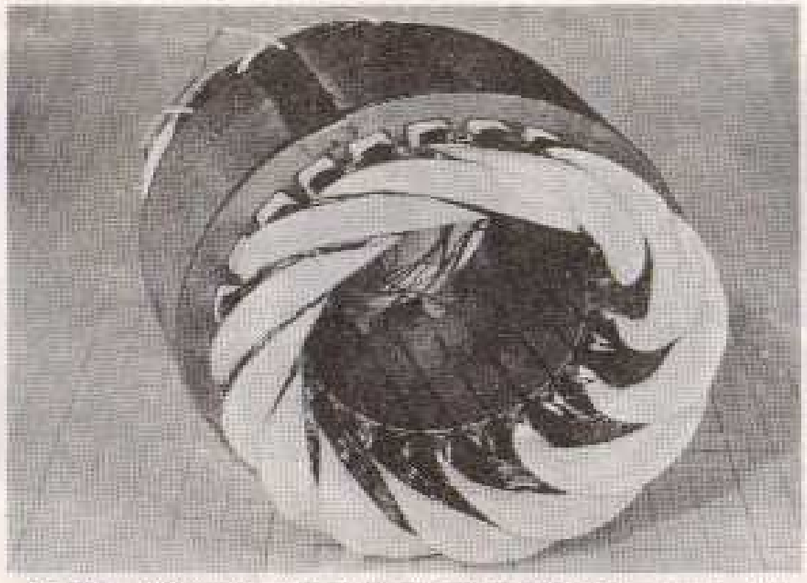


Fig. 49. — Aislamientos entre fases una vez concluida la inserción del arrollamiento a dos capas, con bobinas concéntricas (cortesía de Siemens-Schuckert, Erlangen).

figuras 48 y 49, que representan arrollamientos a dos capas, ejecutados con bobinas concéntricas.

10. Verificación de las conexiones pertinentes

Este trabajo debe ser realizado por especialistas, y rigurosamente controlado por el encargado de taller, sobre todo si se trata de arrollamientos especiales.

El tiempo que requiere la ejecución correcta de conexiones es muy considerable, por lo que — sobre todo en fabricaciones en serie — se debe procurar escoger arrollamientos de pocas y fáciles conexiones, o mejor — si ello fuera posible — idear arrollamientos en los que no sea necesario practicar conexiones.

Algunos arrollamientos que a una y dos capas exigen necesariamente cierto número de conexiones, ahorran este trabajo si se ejecutan como arrollamientos mixtos.

En este punto vuelve a presentarse la necesaria colaboración entre la oficina de cálculo y el taller. En general, el calculista se mueve en un terreno teórico en el que nada importa tener que hacer muchas conexiones o pocas; por ello queda plenamente justificada la intervención del encargado de taller, que procurará simplificar los procesos todo lo posible.

Estudiando atentamente algunos esquemas de arrollamientos, se observará que, en algunos casos, es posible devanar sin interrupción todos los grupos de bobinas de cada una de las fases. Así, por ejemplo, los cuatro grupos en serie de una de las fases de un arrollamiento de cuatro polos pueden devanarse sin interrupción en el torno, con el único cuidado de que entre los grupos 1 y 2, y los grupos 3 y 4, quede suficiente longitud de conductor para permitir «invertir» los grupos 2 y 4 al insertarlos en la máquina, de modo que se forme la polaridad correcta. Si dichos cuatro grupos se devanan por separado, se necesitarán hacer 4 conexiones (12 para el arrollamiento trifásico), mientras que devanados sin interrupción no son necesarias conexiones.

Como ya hemos indicado antes, conviene que el jefe de taller no introduzca modificaciones sin consultar antes con la oficina de cálculo, pues puede ocurrir que haya que tener en cuenta otras circunstancias importantes no previsibles por el encargado del taller.

Cuando se realicen conexiones, éstas deberán ser limpias y consistentes. Un método aseado que deja la conexión bien aislada es el siguiente:

— 1.° Se pelan los terminales en una longitud de unos 2 cm cada uno.

— 2.° Se pasa un tubo barnizado, de unos 6 cm, por cada uno de los terminales.

— 3.° Sobre uno de los tubos colocados, se pasa otro tubo análogo de diámetro algo mayor, y de una longitud de unos 5 cm.

— 4.° Se retuercen los terminales, y se sueldan bien.

— 5.° Se desliza el tubo de mayor diámetro sobre los otros dos tubos, hasta cubrir por completo la conexión.

Las conexiones que es necesario realizar resultan más fáciles de determinar con exactitud si se dispone de un plan a seguir. En la segunda parte de este libro, a partir de la página 208, se presentan tablas y 110 esquemas de conexiones que agrupan todos los casos posibles (en serie y en paralelo, en triángulo y estrella) realizables para arrollamientos hasta de 12 polos inclusive, cualquiera que sea su tipo (polos alternados o polos consecuentes), y cualquiera que sea el número de ranuras de la máquina.

11. Ligadura de las cabezas de bobinas

Una vez realizadas las conexiones y colocados los aislamientos flexibles de los terminales, se procede a sujetar las cabezas de bobinas.

Esta operación tiene como fines esenciales:

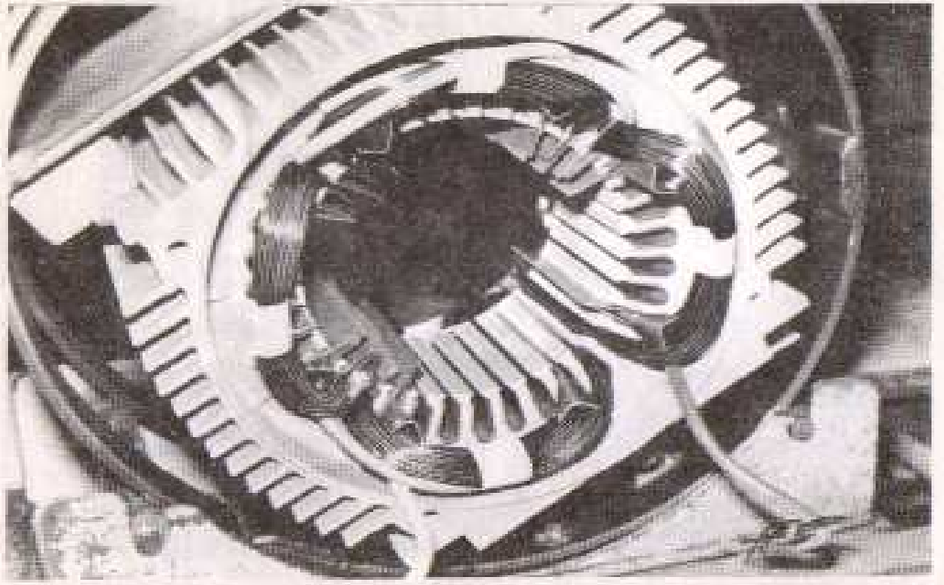


Fig. 50. — Sujeción de cabezas de bobinas concéntricas (cortesía de Asea/Ces. Sabadell).

impedir que los esfuerzos mecánicos que se presentarán en las cabezas de bobinas al circular corriente (esfuerzos que se harán sentir, sobre todo, en las cabezas de máquinas bipolares), puedan ocasionar daños al arrollamiento; sujetar las conexiones realizadas entre grupos, y los tubos flexibles que salen a la placa de bornes, o que quedarán dentro (punto neutro); dar consistencia y forma al conjunto de cabezas de bobinas de todo el arrollamiento.

El vendaje de las cabezas de bobinas se realiza solamente en casos de excepción; dicho vendaje puede dificultar la buena impregnación del arrollamiento.

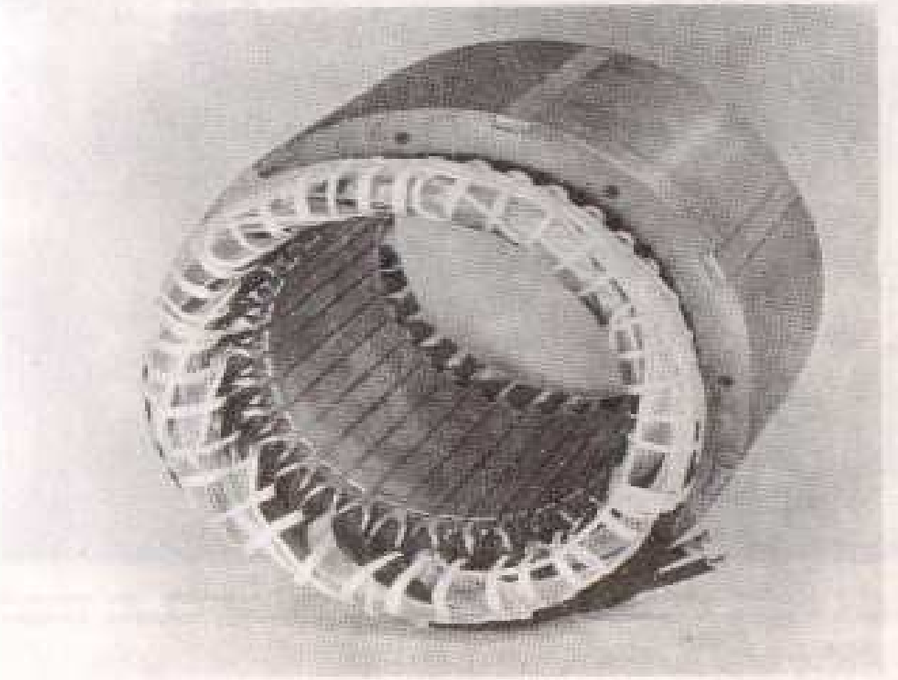


Fig. 51. — Ligadura a mano de las cabezas de bobinas. Aspecto una vez concluida la operación (cortesía de Siemens-Schuckert, Erlangen).

La figura 50 muestra cómo se han sujetado con cinta adhesiva las cabezas de bobinas de un mismo grupo de un arrollamiento (todavía no insertado totalmente) de bobinas concéntricas. Además de ello, las cabezas de bobinas se atarán todas entre sí, arrollando una cinta de algodón (figura 51). Esta operación se realiza manualmente con ayuda de pasadores, y

en la fabricación de grandes series puede ser ejecutada por máquinas automáticas (fig. 52).

Fig. 52. — Ligadura automática de las cabezas de bobinas. La operaria sólo realiza las operaciones de puesta en máquina y acabado (cortesía de Siemens-Schuckert, Erlangen).

12. Ensayo eléctrico del aislamiento

Concluido el arrollamiento de la máquina, así como las conexiones y liga dura de las cabezas de bobinas, antes de someterlo al proceso de impregnación conviene realizar varias pruebas, con objeto de ahorrar trabajos inútiles en el caso de que hubiera tenido lugar algún defecto de aislamiento. Las pruebas se suelen ejecutar en bancos especialmente preparados para ello (fig. 53).

Según las normas, la tensión de ensayo de rigidez dieléctrica debe ser igual al doble de la tensión nominal de la máquina, más 1.000 V, tensión que se deberá mantener durante 1 minuto.

Así, para un motor de 220/380 V, la tensión de ensayo según las normas será de $2 \times 380 + 1.000 = 1.760$ V, y se deberá mantener esta tensión (alterna) durante 1 minuto, en cada prueba efectuada.

Pese a las normas, se suele aplicar ya antes de la impregnación una tensión superior a la indicada, mientras que se acostumbra a reducir la duración del ensayo, con el fin de ahorrar tiempo.

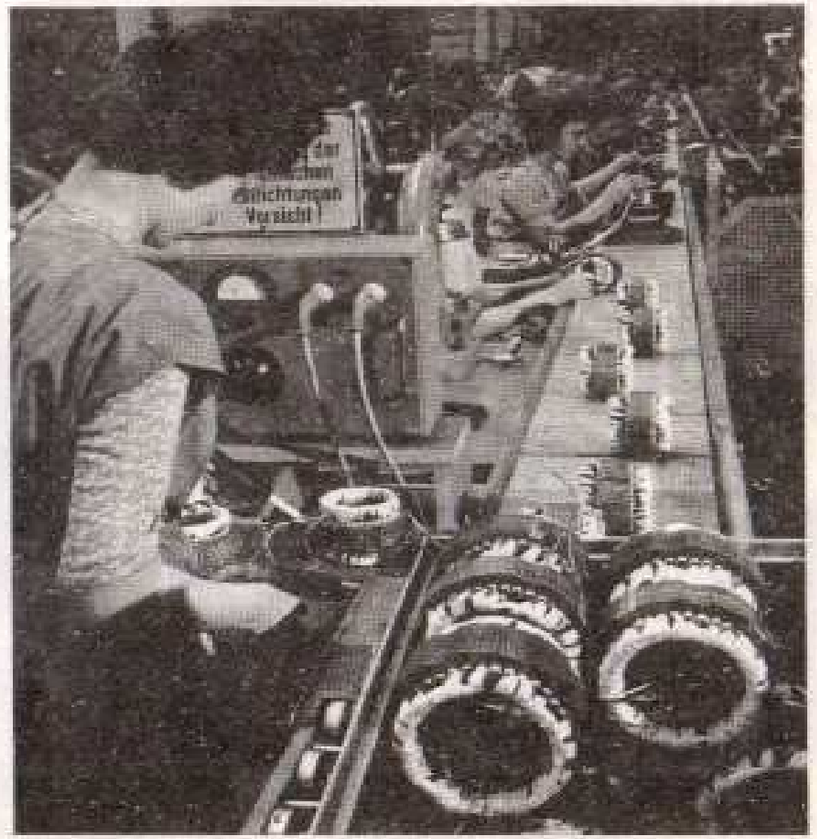


Fig. 53. — Puesto de ensayo eléctrico rápido del aislamiento, antes de ser sometido a la impregnación (cortesía de Siemens-Schuckert, Erlangen).

Antes de la impregnación se hará, por lo menos:

— Un ensayo a masa de cada uno de los principios (*U, V, W*) o finales (*X, Y, Z*) del arrollamiento.

— Un ensayo de aislamiento entre fases: Estando sin conectar (y aislados) los seis terminales del arrollamiento trifásico, se aplicará la tensión de prueba entre cada dos terminales de fases distintas (por ejemplo: *U-V, U-W* y *V-W*).

Es conveniente, además, y rápido de ensayar y comprobar con la lámpara de pruebas que no hay ninguna interrupción entre fases.

Advertencia:

En una máquina que haya estado largo tiempo sin funcionar (por ejemplo: tal vez las que se reciben para reparaciones), es peligroso para el arrollamiento realizar pruebas de aislamiento sin someter la máquina a un secado previo. No se debería nunca prescindir de dicho secado previo, por corta que fuese la prueba a efectuar.

La tensión de ensayo de máquinas usadas (después de limpias y secadas) será igual a 1,5 veces la tensión nominal, pero nunca menor de 500 V.

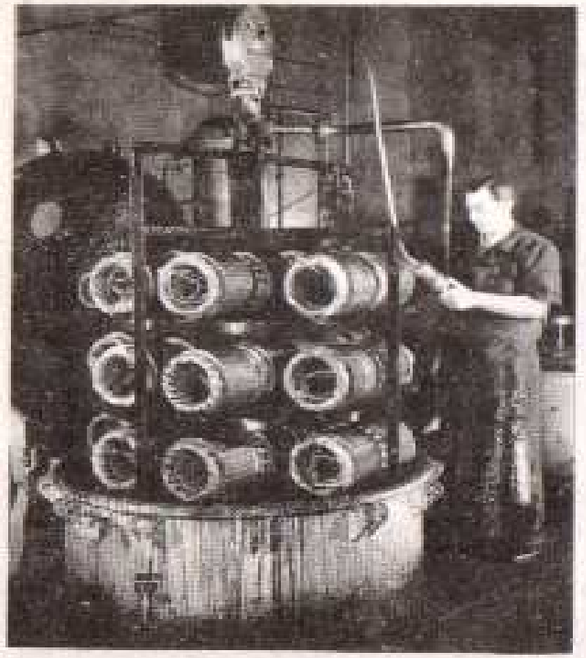


Fig. 54. — Cuba de impregnación al vacío (cortesía de Siemens-Schuckert, Erlangen).

13. Impregnación y secado

Sobre estos procesos ya se ha dado extensa información en el capítulo de aislamientos. Sólo insistiremos aquí en que la correcta ejecución de estos procesos tiene una decisiva importancia en la calidad definitiva de la máquina eléctrica.

La figura 54 muestra una cuba de impregnación con capacidad para gran número de piezas simultáneamente. La figura 55 presenta el arrollamiento del estator de un motor (de 18,5 kW, 220/380 V, 36 ranuras, 2 polos, trifásico, a dos capas, con bobinas concéntricas), después de la impregnación, listo ya para ser encajado en la carcasa, que aparece junto al estator.

Tras la impregnación y secado, se procederá al montaje completo de la máquina, y a los ensayos generales de la misma.

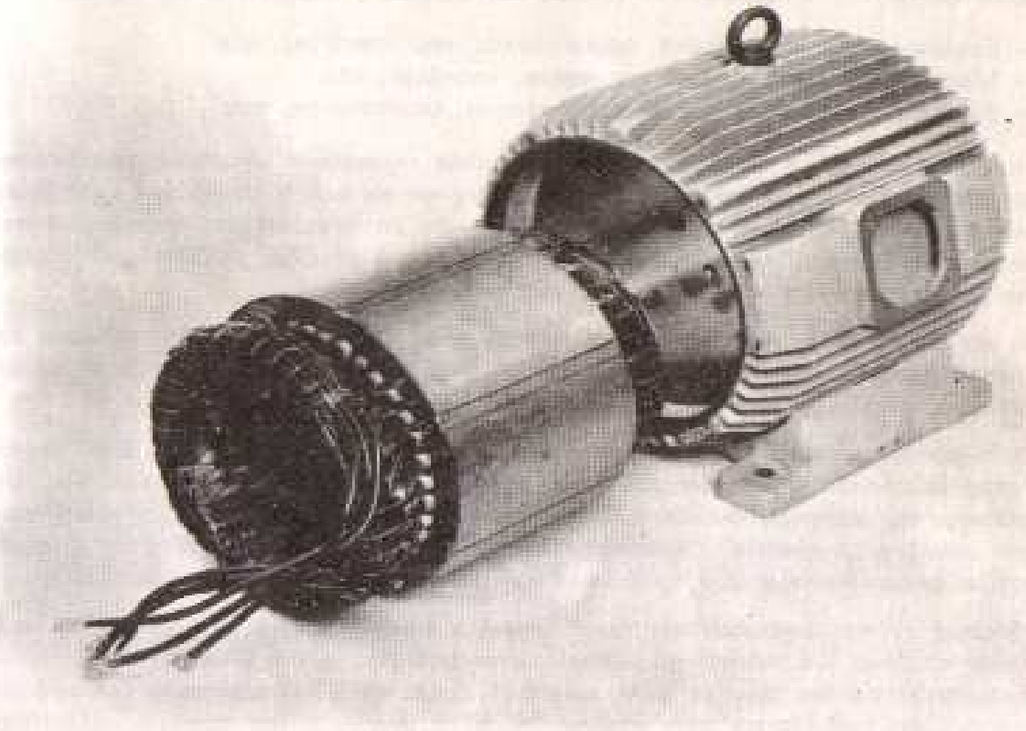


Fig. 55. — Estator de un motor trifásico, junto a su carcasa correspondiente, tras su impregnación y secado final (cortesía de Siemens-Schuckert, Erlangen).

CAPITULO IV

AVERIAS, SU LOCALIZACION Y REPARACION

1. Introducción

Cuando una máquina eléctrica no arranca, o presenta alguna anomalía durante su funcionamiento, ello puede ser debido a tres tipos de causas:

— Exteriores a la máquina, tales como: red, fusibles, etc.
— Mecánicas, tales como: cojinetes, montaje, etc.
— Eléctricas, tales como: arrollamientos, conexiones, etc.

Aunque a veces, a simple vista, es posible reconocer la causa que produce una avería, en la mayoría de los casos no es así; y como las máquinas defectuosas, en general, llegan al taller de reparación sin indicación expresa del defecto, resulta necesario ponerlas a prueba, determinar la anomalía, localizar su origen, y ponerle remedio.

En este capítulo, examinaremos las averías que más frecuentemente se presentan en los motores asincrónicos trifásicos, tanto en los de rotor en jaula de ardilla como en los de rotor de anillos rozantes.

Para ello conectaremos al motor a la red, con lo que se pondrá de manifiesto la anomalía en cuestión. De acuerdo con la clase de anomalía, estudiaremos ordenadamente las causas exteriores, mecánicas o eléctricas que pueden originarla. Determinada la causa, y localizado el punto donde actúa, expondremos qué medidas hay que tomar para reparar la avería.

Muchas veces, distintas averías tienen un mismo origen, de modo que conviene ordenar las causas para analizarlas una a una, sin repetición. Por ello, numeraremos las causas exteriores (1, 2, 3, etc.), designando las causas mecánicas por letras minúsculas (a, b, c, etc.), y las causas eléctricas por letras mayúsculas (A, B, C, etc.), estudiándolas separadamente tras enunciar las que corresponden a cada una de las anomalías consideradas.

2. Al conectar el motor a la red, éste no arranca

Los motores asincrónicos trifásicos deben arrancar al ser adecuadamente conectados a la red de alimentación, tanto si arrancan en vacío como si deben soportar desde un principio la carga nominal. Si el motor no arranca, hay que averiguar la causa, que será una de las que siguen:

Causas posibles exteriores al motor:

— No hay tensión en la red de alimentación. (1)
— No funciona el interruptor de la red. (2)
— Uno o más fusibles están fundidos. (3)
— Interrupción en los cables que van a la caja de bornes. (4)
— Insuficiente tensión de la red. (5)
— Excesiva caída de tensión en los cables que van a la caja de bornes. (6)
— Interrupción en el reóstato de arranque. (7)
— Interrupción en el combinador estrella-triángulo. (8)

Causas mecánicas posibles:

— Cojinetes desgastados. (a)
— Cojinetes agarrotados. (b)
— Cuerpo extraño en el entrehierro. (c)
— Sobrecarga excesiva. (d)

Causas eléctricas posibles:

— Las escobillas no apoyan sobre los anillos rozantes. (A)
— Interrupción en una o más fases. (B)
— Bobina, o grupo, en cortocircuito. (C)
— Barras del rotor flojas. (D)
— Conexiones interiores equivocadas. (E)
— Arrollamiento con un contacto a masa. (F)

3. El motor arranca con dificultad. La velocidad baja mucho con la carga

Causas posibles exteriores al motor:

— Insuficiente tensión de la red. (5)
— Excesiva caída de tensión en los cables que van a la caja de bornes. (6)

Causas eléctricas posibles:

— Estator conectado en estrella, en vez de triángulo. (G)

4. El motor arranca de golpe

Causas posibles exteriores al motor:

— Resistencia inicial del reóstato de arranque demasiado pequeña. (9)
— Interrupción, por contactos quemados, del reóstato de arranque. (10)
— Conexión equivocada del reóstato de arranque. (11)

Causas eléctricas posibles:

— Cortocircuito en el arrollamiento del rotor. (C)

5. El motor zumba al arrancar.
La corriente del estator oscila durante la marcha del motor

Causas eléctricas posibles:

— Interrupción de alguna de las fases del rotor. (B)
— Cortocircuito en el arrollamiento del rotor. (C)

6. El motor arranca bien, pero marcha irregularmente

Causas posibles exteriores al motor:

— Algún fusible fundido. (3)
— Interrupción en los cables que van a la caja de bornes. (4)
— La frecuencia de la red no es la correspondiente al motor. (12)
— Inadecuada tensión de la red de alimentación. (13)
— Acoplamiento, o polea de transmisión, mal equilibrados. (14)
— Acoplamiento, o polea de transmisión, flojos. (15)
— Correa de transmisión estropeada. (16)

Causas mecánicas posibles:

— Cojinetes desgastados. (a)
— Cuerpos extraños en el entrehierro. (c)
— Defectuoso montaje de la máquina. (e)
— Roce del rotor con el estator. (f)

Causas eléctricas posibles:

— Interrupción en alguna de las fases. (B)
— Bobina, o grupo, en cortocircuito. (C)
— Barras del rotor flojas. (D)
— Arrollamiento con un contacto a masa. (F)
— Inversión de alguna fase. (E)
— Interrupción de alguna conexión en paralelo. (H)

7. El motor marcha muy despacio

Causas posibles exteriores al motor:

— Tensión de alimentación demasiado débil. (5)
— Excesiva caída de tensión en los cables que van a la caja de bornes. (6)
— Interrupción en el reóstato de arranque. (7)
— La frecuencia de la red no es la correspondiente al motor. (12)

Causas mecánicas posibles:

— Cojinetes desgastados. (a)
— Sobrecarga excesiva. (d)

Causas eléctricas posibles:

— Interrupción de alguna de las fases. (B)
— Bobina, o grupo, en cortocircuito. (C)
— Barras del rotor flojas. (D)
— Inversión de alguna bobina o grupo. (E)
— Inversión de alguna fase. (E)

8. El motor se calienta en exceso

Conviene advertir aquí que toda máquina eléctrica en funcionamiento debe calentarse, de lo contrario no es económica. Se entiende que una máquina eléctrica se calienta en exceso cuando su temperatura interior alcanza la temperatura límite prevista para los aislamientos (ver cap. I). Que una máquina queme al tocarla, no significa necesariamente que su calentamiento sea excesivo, aunque el tacto puede servir de orientación, si se tiene práctica.

Causas posibles exteriores al motor:

— Interrupción de alguno de los cables que van a la caja de bornes. (4)
— Inadecuada tensión de la red de alimentación. (13)
— Excesiva tensión, o deslizamiento, de la correa de transmisión. (16)

Causas mecánicas posibles:

— Cojinetes desgastados. (a)
— Sobrecarga excesiva. (d)
— Cojinetes demasiado ajustados. (g)
— Refrigeración parcialmente impedida. (h)
— La refrigeración no funciona. (i)
— Chapas mal apretadas. (j)

Causas eléctricas posibles:

— Interrupción en alguna de las fases. (B)
— Bobina, o grupo, en cortocircuito. (C)
— Barras del rotor flojas (D)
— Falsa conexión del arrollamiento del estator. (G)
— Excesiva frecuencia de conexión y desconexión del motor a la red. (I)

9. Otras anomalías

El motor zumba y se calienta enseguida. Huele a quemado:

— Cortocircuito en los arrollamientos. (C)

El motor no arranca en estrella, o lo hace con dificultad:

— Interrupción, por contactos desgastados, del combinador estrella-triángulo. (8)
— Carga excesiva. (d)

El motor no suministra potencia:

— Insuficiente tensión de la red de alimentación. (5)
— Excesiva caída de tensión en los cables que van a la caja de bornes. (6)
— Cortocircuito en el arrollamiento del rotor. (C)
— Barras del rotor flojas. (D)

Se producen chispas en las escobillas del motor de anillos rozantes:

— Escobillas mal ajustadas. (k)
— Anillos rozantes picados, o desgastados. (l)

El motor produce ruidos anormales:

— Roce del rotor con el estator. (f)
— Falta de engrase, aceite usado o de baja calidad. (g)
— Mala elección de la relación de ranuras rotor/estator. (J).

10. Causas exteriores al motor, localización y corrección:

Las expondremos en el mismo orden que han ido apareciendo en los anteriores epígrafes, manteniendo la correspondiente numeración:

(1) *No hay tensión en la red de alimentación:*

Con el interruptor abierto, se comprueba si hay tensión entre las tres fases de la red, midiéndola con un voltímetro. Basta que falte tensión entre dos fases cualesquiera para que el motor no pueda arrancar, aunque no esté averiado.

(2) *No funciona el interruptor de la red:*

Puede que si exista tensión entre las tres fases de la red pero que, por no funcionar el interruptor de salida, la tensión no llegue al motor. Estando dicho interruptor cerrado, se mide la tensión entre cada par de polos de salida del mismo. El motor no arrancará si falta tensión entre dos polos cualesquiera del interruptor.

(3) *Uno o más fusibles están fundidos:*

Para comprobarlo, estando la red desconectada, se saca un fusible y se ensaya; basta intercalarlo en un circuito de baja tensión con una lámpara (fig. 56): si la lámpara se enciende, el fusible no está fundido. La operación se repite con los restantes fusibles. Un único fusible fundido es suficiente para que el motor no pueda arrancar. Si el fusible se funde mientras el motor está en marcha, el motor trifásico girará como monofásico (produciendo ruido, calentándose y perdiendo potencia). Tal situación no debe permitirse por largo tiempo, ya que hay peligro de destruir el arrollamiento del estator. Para averiguar (si hay dudas) si un motor trifásico está girando como monofásico, basta desconectarlo de la red, esperar hasta que

cese de girar y conectarlo de nuevo: el motor no arrancará si hay interrupción de una fase (por ejemplo, si hay un fusible fundido).

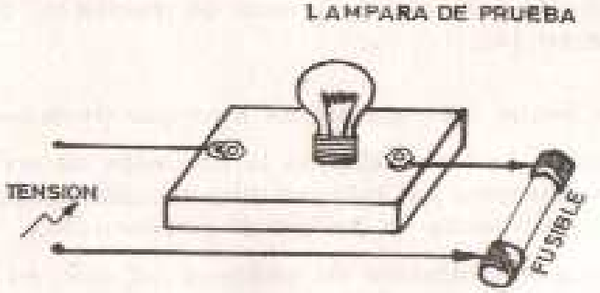


Fig. 56. — Comprobación del estado de los fusibles con la lámpara de prueba.

(4) *Interrupción en los cables que van a la caja de bornes:*

Para comprobar si tiene lugar este defecto, se medirá la tensión en los propios bornes del motor; si llega tensión a las tres fases, no hay rotura de cables. Si no llega tensión a alguna fase, y hay tensión en la red, funciona bien y está cerrado el interruptor, y los fusibles están intactos, uno de los cables de conexión está interrumpido. Si la rotura de un cable tiene lugar durante la marcha del motor, hay que tomar las precauciones citadas en (3).

(5) *Insuficiente tensión de la red:*

Se comprueba como en (1), comparando la medición efectuada con la tensión que consta en la placa de características del motor.

Si la tensión es insuficiente, y no cabe disponer de otra superior, hay que rebobinar el estator, intercalar un transformador, o utilizar otro motor.

La mínima tensión necesaria para el arranque de un motor trifásico está prescrita por normas que deben ser atendidas por el constructor.

(6) *Excesiva caída de tensión en los cables que van a la caja de bornes:*

Se mide la tensión como se ha dicho en (4), y se compara con la tensión medida en la red. Si esta última es apta para el motor y, en cambio, no lo es la tensión medida en bornes, es porque la caída de tensión en los cables es excesiva.

Es necesario sustituir los cables por otros de mayor diámetro (ver tabla 4).

Tabla 4. *Conductores de línea*

Intensidad por conductor (A)	Diámetro mínimo del hilo a utilizar (mm)									
	Trifásica				Bifásica		Monofásica			
	220 voltios		380 voltios		220 voltios		110 voltios		220 voltios	
	50 m	100 m	50 m	100 m	50 m	100 m	50 m	100 m	50 m	100 m
5	1,2	1,6	1,2	1,2	1,2	1,4	1,4	2,0	1,2	1,4
10	1,6	2,0	1,4	1,6	1,4	2,0	2,0	3,0	1,4	2,0
15	2,0	2,5	2,0	2,0	2,0	2,5	2,5	7×1,4	2,0	2,5
20	2,5	3,0	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	7×1,6	2,5	3,0
30	3,0	7×1,4	3,0	3,0	3,0	7×1,4	7×1,4	19×1,2	3,0	7×1,4
40	7×1,4	7×1,6	7×1,4	7×1,4	7×1,4	7×1,6	7×1,4	19×1,4	7×1,4	7×1,6
50	7×1,6	7×1,8	7×1,6	7×1,6	7×1,6	7×1,8	7×1,6	19×1,6	7×1,6	7×1,8
60	7×1,8	7×1,8	7×1,8	7×1,8	7×1,8	19×1,2	7×1,8	19×1,8	7×1,8	19×1,2
80	19×1,4	19×1,4	19×1,4	19×1,4	19×1,4	19×1,4	19×1,4	19×2,0	19×1,4	19×1,4

Ejemplo aclaratorio:

Motor trifásico 380 V, 40 A, longitud de cables 50 m. Se tomarán, para cada fase, 7 conductores (paralelo), de 1,4 mm de diámetro, como mínimo.

(7) *Interrupción en el reóstato de arranque:*

Avería que puede tener lugar en los motores trifásicos con rotor de anillos rozantes, que utilizan un reóstato para el arranque. Dicho rotor dispone de un arrollamiento semejante al del estator, pudiendo estar conectado en triángulo o en estrella (más frecuente esta última conexión). En cualquier caso, los tres terminales libres van directamente soldados a sendos anillos, que están calados en el eje del rotor. Para el arranque del motor, los anillos quedan cortocircuitados a través de todas las resistencias óhmicas de un reóstato (fig. 57).

Una interrupción en alguna de las resistencias del reóstato de arranque libera el cortocircuito de los tres anillos rozantes, lo que es causa suficiente para que el motor no pueda arrancar o, si ello sucede durante la marcha del motor, éste gire con lentitud y se caliente.

Es necesario comprobar, aparte, el perfecto estado del reóstato.

(8) *Interrupción del combinador estrella-triángulo:*

Para facilitar el arranque de un motor asincrónico trifásico, resulta ventajoso aplicarle primero la tensión correspondiente a la conexión en estrella, pasando seguidamente a la conexión en triángulo, que

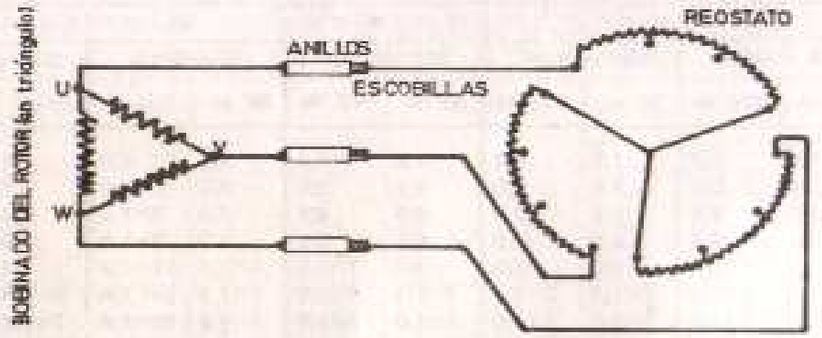


Fig. 57. — Reóstato de arranque de un motor con rotor de anillos rozantes. La figura presenta un rotor conectado en triángulo, pero podría estar conectado en estrella. La posición del reóstato corresponde a la de arranque, o sea, con todas las resistencias intercaladas.

corresponde a la marcha de régimen del motor. Dicha maniobra se efectúa mediante un inversor tripolar llamado combinador estrella-triángulo (fig. 58).

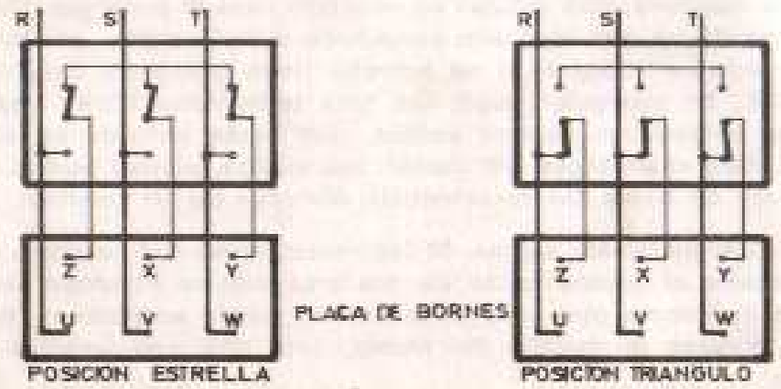


Fig. 58. — Combinador estrella-triángulo, en sus dos posiciones.

Una interrupción del combinador equivale a dejar el motor como monofásico, cuestión que hemos analizado anteriormente.

La existencia de esta avería se pone de manifiesto de modo análogo al expuesto en (4).

(9) *Resistencia inicial del reóstato de arranque demasiado pequeña.*

Si esto sucede, la intensidad de la corriente de arranque que atraviesa el arrollamiento del rotor es muy elevada, provocando un arranque brusco y poniendo en peligro el arrollamiento.

La resistencia del reóstato de arranque es nula en la posición correspondiente a la velocidad de régimen del motor. Si el reóstato no recupera automáticamente su posición de arranque al parar el motor, puede ocurrir que, descuidadamente, se intente arrancar el motor estando directamente cortocircuitados los anillos. Esto originaría un violento arranque, pudiendo destruir el arrollamiento del rotor.

Es, pues, necesario, verificar la posición del reóstato de arranque antes de conectar el motor.

Si el motor arranca bruscamente pero funciona bien a la velocidad de régimen (sin ruido ni calentamiento, etc.) habrá que buscar la avería en el reóstato de arranque. Si no está quemado ninguno de sus contactos, y están limpios, hay que modificar las resistencias del reóstato, aumentándolas.

(10) *Interrupción, por contactos quemados, del reóstato de arranque:*

El reóstato de arranque intercala unas resistencias que se van eliminando progresivamente a medida que el motor toma velocidad. Pero si alguno de los contactos del reóstato estuviese quemado, las resistencias del grupo correspondiente no quedarían intercaladas (interrupción pasajera), y sólo al saltar al siguiente contacto se renovaría el cortocircuito de los anillos.

La supresión de uno de los grupos de resistencias determina que su eliminación no tenga lugar de modo progresivo, sino con un salto, lo que se traduce en un arranque brusco del rotor.

Es necesario comprobar el estado de los contactos del reóstato de arranque, y proceder a su limpieza y reparación, si son necesarias.

(11) *Conexión equivocada del reóstato de arranque:*

Si el reóstato de arranque se conecta invertido, o sucede el descuido indicado en (9), en la posición de arranque estará el rotor directamente cortocircuitado, sucediendo lo expuesto en (9).

Hay que comprobar la conexión del reóstato de acuerdo con el plano de conexiones correspondiente. Si hubiese dudas, se miden las resistencias (en bornes del reóstato) en las dos posiciones extremas.

En la posición correcta para el arranque, se debe leer la resistencia mayor. En la posición de velocidad de régimen del motor, la resistencia medida debe ser nula.

(12) *La frecuencia de la red no es la correspondiente al motor:*

Si es así, se comprobará porque el número de revoluciones previsto en la placa de características del motor no coincidirá con el número de r. p. m. de régimen, aunque el motor no presente defecto aparente. Girará más rápido si la frecuencia de la red es superior a la frecuencia nominal, y más lento en caso contrario.

Además de la diferencia en la velocidad, la capacidad de carga de la máquina no será la prevista, debido a que han variado las condiciones magnéticas.

Para recobrar las condiciones previstas por el cálculo, es necesario modificar la tensión en bornes del motor, o rebobinarlo con otro número de espiras (ver cap. VI, § 4).

(13) *Inadecuada tensión en bornes:*

Si la tensión en bornes es menor que un valor límite, el motor no arrancará, o lo hará con dificultad, disminuyendo su velocidad al crecer la carga. Además, el motor se calentará, por absorber una corriente excesiva, lo que puede comprobarse por simple lectura de los amperímetros, comparando el valor medido con la intensidad nominal que figura en la placa de características.

Si la tensión en bornes es insuficiente, hay que verificar la tensión de la red (5), así como la caída de potencial en los cables que van a la caja de bornes (6).

Si la tensión en bornes es excesiva (lo que solamente puede estar originado por una excesiva tensión de la red), el motor se calentará inadmisiblemente, porque las pérdidas magnéticas son entonces muy grandes. La tensión en bornes nunca debe ser superior al 105 % de la tensión nominal.

Si no se puede modificar la tensión en bornes, no hay otra solución que rebobinar el motor.

(14) *Acoplamiento o polea de transmisión mal equilibrados:*

No basta con equilibrar estática y dinámicamente los rotores de las máquinas eléctricas, sino que, además, es necesario que las piezas que giran solidarias al rotor estén bien equilibradas; de lo contrario (sobre todo si la velocidad es grande), aparecen esfuerzos radiales que pueden provocar una marcha irregular del motor.

Para evitar, o corregir, este defecto, se debe equilibrar simultáneamente el conjunto formado por el rotor y el acoplamiento, o por el rotor y la polea de transmisión.

(15) *Acoplamiento o polea de transmisión flojos:*

Evidentemente este descuido puede ser la causa de una marcha irregular del motor. El acoplamiento de dos ejes no solamente exige una perfecta alineación de los mismos, sino también una solidez de sujeción del sistema de acoplamiento. Asimismo, la polea de transmisión debe estar firmemente enchavetada, sin huelgo sensible.

(16) *Correa de transmisión estropeada, o demasiado tensa, o que desliza:*

Si la correa está desgarrada, o su superficie presenta desigualdades (garfios o ligaduras de unión), puede ocasionar pérdida de potencia, vibraciones periódicas, etc.

Por otra parte, la correa no debe abrazar un arco excesivo, ni tampoco insuficiente, de las poleas motora y receptora. En el primero de los casos, la correa quedaría demasiado tensa; en el segundo caso, deslizaría. En ambos casos la consecuencia es, como mínimo, un calentamiento excesivo del motor.

Para ajustar la tensión de las correas, se desplaza el motor sobre unas guías.

11. Causas mecánicas posibles, localización y corrección:

Las expondremos en el mismo orden que han ido apareciendo en los anteriores epígrafes, manteniendo la correspondiente designación:

(a) *Cojinetes desgastados:*

Si el desgaste de los cojinetes es sensible, el rotor rozará con el estator produciendo mucho ruido cuando el motor gire.

Si el desgaste es exagerado, el rotor apoyará sobre el estator, quedando imposibilitado el arranque del motor.

En los motores de pequeño tamaño, puede comprobarse el estado de los cojinetes, sin necesidad de desmontarlos, tirando del eje del motor, tal como indica la figura 59; si se logra mover el eje, los cojinetes estarán desgaastados. En este caso, hay que cambiarlos, no sin comprobar el daño que haya podido ocasionar el roce del rotor con el estator.

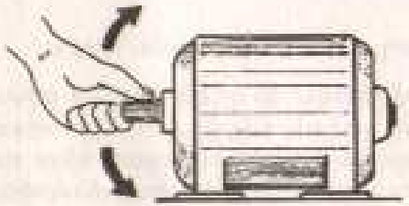


Fig. 59. — Comprobación de cojinetes desgastados, en un motor pequeño.

Cuando, por las dimensiones de la máquina, no es posible llevar a cabo la sencilla comprobación antedicha, si el entrehierro del motor es accesible a través de los escudos, se intentará comprobar su espesor con galgas adecuadas; si el entrehierro no es constante en toda la periferia del rotor, los cojinetes deben ser sustituidos.

(b) *Cojinetes agarrotados:*

Debido a una dilatación provocada por sobrecalentamiento, los cojinetes pueden llegar a soldarse al eje del motor, agarrotándolo. Se suele decir, entonces, que los cojinetes están agarrotados.

Si el rotor no se puede hacer girar a mano, es muy probable que los cojinetes estén agarrotados. En este caso, se desmontan los escudos (fig. 60) y se extraen los cojinetes del eje. La operación, engorrosa a mano, puede facilitarse con ayuda de un dispositivo como el de la figura 9 (pág. 291). Si el eje estuviese dañado, hay

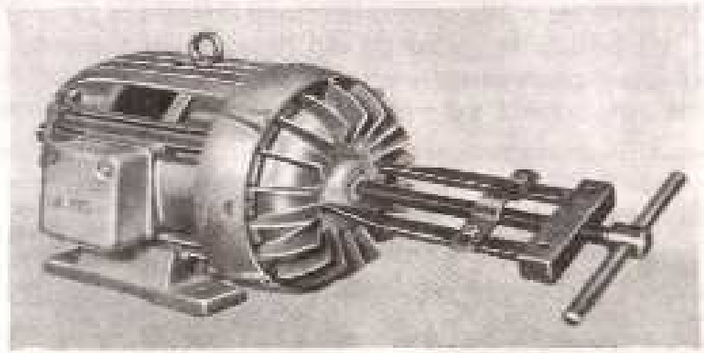


Fig. 60. — Dispositivo para la extracción de escudos. Conviene antes señalar su posición respecto de la carcasa (cortesía de A.E.G., Berlín).

que metalizarlo y tornearlo, o simplemente tornearlo a un diámetro ligeramente inferior al original, utilizando nuevos cojinetes.

(c) *Cuerpo extraño en el entrehierro:*

Si en el entrehierro, esto es, en la estrecha zona de aire existente entre el rotor y el estator, se han introducido cuerpos extraños (virutas metálicas, restos de conductores, barniz de impregnación, etc.), éstos dificultarán el giro del motor y producirán ruido, o bien llegarán a impedir el giro de la máquina, si abultan mucho y son resistentes.

Hay que desmontar el rotor y eliminar toda suciedad y estorbos de la superficie del entrehierro.

(d) *Sobrecarga excesiva:*

Si la sobrecarga de un motor asincrónico sobrepasa cierto límite, la máquina no logra arrancar. Si al disminuir la carga el motor arranca bien y funciona normalmente, es que la sobrecarga era excesiva.

En las condiciones de arranque, o sea, a motor parado, la corriente que atraviesa los arrollamientos es muy elevada. Si el rotor no ini-

cia el giro, no se debe mantener la conexión a la red; de lo contrario, se pueden destruir los bobinados.

Si el motor no arranca por exceso de sobrecarga, no queda otra solución que disminuir la carga, utilizar otro motor de mayor potencia o de par de arranque más elevado, o bien, si es factible, introducir modificaciones oportunas en el circuito del rotor (por ejemplo, disminuir las resistencias del reóstato de arranque; o, en los motores de rotor en jaula de ardilla, tornear los anillos de cortocircuito para disminuir la sección de los mismos).

(e) *Defectuoso montaje de la máquina:*

Los defectos de montaje suelen ocasionar ruidos mecánicos y marcha irregular del motor. Los ruidos anormales de origen mecánico pueden distinguirse fácilmente de los motivados por anomalías eléctricas.

Para diferenciarlos basta, una vez que el motor ha alcanzado la velocidad de régimen, desconectar la máquina de la red; si el ruido anormal persiste, sólo puede tener una causa mecánica (entrehierro irregular, cuerpos extraños en el entrehierro, polea de transmisión, etcétera).

Continuando con los defectos de montaje: Si, por ejemplo, los escudos se disponen mal encarados respecto de la carcasa de la máquina, y se asegura su defectuosa posición mediante tornillos bien apretados, el eje del rotor no coincidirá con el eje ideal del motor, ya que los cojinetes no estarán alineados.

Para corregir la mencionada deficiencia, se aflojan los tornillos que sujetan los escudos, y se endereza la posición de éstos, situándolos bien enfrentados respecto de la carcasa. Los tornillos, o pernos, de sujeción deben ir presionando uniformemente sobre los escudos; así, pues, primero se atornillan todos un poco, después se aprietan todos un poco más, etc.

(f) *Roce del rotor con el estator:*

Ya hemos dicho (a) que unos cojinetes desgastados pueden ocasionar el roce del rotor con el estator. Lo mismo puede suceder si el eje del rotor está combado, sea por defecto de fabricación, sea por haber sufrido algún golpe.

La simetría del rotor puede ser comprobada fácilmente desmontándolo y situándolo entre las puntas de un torno. Al girar el torno, se apreciará la curvatura del eje. Si el defecto no es apreciable a simple vista, se aproxima una tiza hacia el centro del paquete de chapas del rotor (que gira en el torno), hasta rozarlo. Si la tiza dibuja en el rotor una circunferencia completa, el eje está en orden; si hay flexión del eje, la tiza marcará solamente un arco, precisamente en la zona combada.

En algunos casos, cabe enderezar un eje (no siempre un rotor) montándolo sólidamente entre los puntos de un torno y aplicándole una presión, en la zona adecuada, palanqueando con una viga de madera.

La operación debe realizarse lenta y cuidadosamente. El torno debe ser grande en comparación con el eje, sin que haya posibilidad de estropearle las puntas.

(g) *Cojinetes demasiado ajustados:*

En general, la temperatura de los cojinetes no debe rebasar en más de 40° C (en las máquinas antiguas solamente 25° C) la temperatura ambiente. La falta de engrase, o un aceite defectuoso (sucio, de mala calidad, etc.), puede ocasionar el sobrecalentamiento de los cojinetes, y de ello el apriete excesivo de los mismos, que atenazan el eje y, con el tiempo, se agarrotan (b).

Unos cojinetes demasiado ajustados pueden reconocerse, tras un rato de funcionamiento del motor, por su elevada temperatura. Hay que vigilar el engrase. Si los cojinetes han comenzado a soldarse al eje, hay que sustituirlos y repasar el eje.

(h) *Refrigeración parcialmente impedida:*

Normalmente, los motores asincrónicos que no son de construcción completamente cerrada, llevan refrigeración por ventilador. Este está calado en el eje del rotor, y se encuentra situado dentro de la máquina, en el lado opuesto al de la polea de transmisión.

El ventilador aspira el aire del ambiente y lo impulsa a través de la máquina. El aire refrigerante, convenientemente dirigido por el interior del motor, absorbe el calor producido por las pérdidas y sale, finalmente, al exterior.

Si por alguna causa (por ejemplo: obstrucción parcial del recorrido del aire), la refrigeración del motor no es completa, la máquina se calentará en exceso.

Hay que desmontar el rotor, y comprobar que no existe impedimento alguno para la circulación franca del aire refrigerante.

(i) *La refrigeración no funciona:*

El ventilador, por la posición de sus paletas, puede que solamente aspire aire frío cuando gira en determinado sentido. Si se modifica el sentido de giro del motor (por descuido o intencionadamente), el ventilador podría ser que no impulsara aire frío a través de la máquina.

También puede suceder que la inclinación o el número de paletas del ventilador no sean los adecuados para la velocidad de giro y el volumen de refrigeración del motor.

En los dos casos citados, el resultado es una falta de refrigeración suficiente del motor y, en consecuencia, excesivo calentamiento del mismo. Para comprobar si el ventilador de un motor aspira aire frío (e incluso tener una orientación sobre el caudal aspirado), basta acercar, por unos instantes, una hoja de papel a las rejas del escudo que encierra el ventilador; si éste aspira aire, la hoja de papel quedará retenida, con mayor o menor fuerza según el caudal de aire aspirado.

Si por algún motivo (tensión, frecuencia, etc.) disminuye la velocidad prevista para el motor, la refrigeración será menos intensa; de modo que el verdadero origen de un calentamiento excesivo puede ser la baja velocidad de giro del motor.

Si el sentido de giro del ventilador es erróneo, y no se puede variar el sentido de giro del motor, es necesario invertir la posición del ventilador.

(j) *Chapas mal apretadas:*

Las chapas del paquete del estator, así como las del rotor, deben estar fuertemente comprimidas (con una prensa); de lo contrario, varían las condiciones magnéticas de la máquina, y el motor absorbe una intensidad de corriente excesiva.

Si este defecto concurre, la única solución formal es calcular de nuevo el motor, ya que como la longitud del paquete de chapas es un dato decisivo, no se puede tener la seguridad de que el motor funcione correctamente aunque se comprima el paquete de chapas y se rebobine.

Este defecto es inesperado en motores de origen conocido.

(k) *Escobillas mal ajustadas:*

Si las escobillas no resbalan bien en sus portaescobillas, se pueden producir chispas, durante la marcha del motor, que acabarían por inutilizar los anillos rozantes.

Este defecto se puede comprobar a simple vista, con el motor en marcha.

Las escobillas deben deslizarse en sus alojamientos con exiguo rozamiento, pero sin excesivo juego.

(l) *Anillos rozantes picados o desgastados:*

La superficie de contacto de los anillos rozantes debe estar bien torneada y rectificada, para que presenten una sección pulida y concéntrica con el eje del rotor.

Si los anillos rozantes están picados, pueden ocasionar pequeños saltos de las escobillas cuando el motor gira y, por tanto, pueden saltar chispas. Los anillos picados pueden ser pulimentados con un abrasivo, aprovechando el giro del rotor (ojo con la tensión).

Si las asperezas, o el desgaste de los anillos, son importantes, hay que extraerlos y tornearlos cuidadosamente. Las escobillas habrán de acomodarse al nuevo diámetro de los anillos rozantes.

12. Causas eléctricas posibles, localización y corrección

Las expondremos en el mismo orden que han ido apareciendo en los anteriores epígrafes, manteniendo la correspondiente designación:

(A) *Las escobillas no apoyan sobre los anillos rozantes:*

En este caso, el rotor no queda cortocircuitado y el motor no arrancará. Con el interruptor de la red abierto, se comprueba si todas las escobillas descansan correctamente sobre los anillos.

(B) *Interrupción en una o más fases:*

Si esta avería tiene lugar cuando el motor está parado, éste no podrá arrancar. Si estando el motor en marcha se interrumpe alguna de las fases, sucederá lo expuesto en (3).

La interrupción puede ser debida a rotura del hilo en alguna parte del arrollamiento, o a una conexión que hace mal contacto.

Si el arrollamiento está conectado en estrella, la avería se constata con una lámpara de prueba, uno de cuyos terminales se conecta al punto neutro (*X Y Z*), mientras que el otro extremo se va conectando, sucesivamente, a los terminales *U*, *V* y *W* del arrollamiento (figura 61).

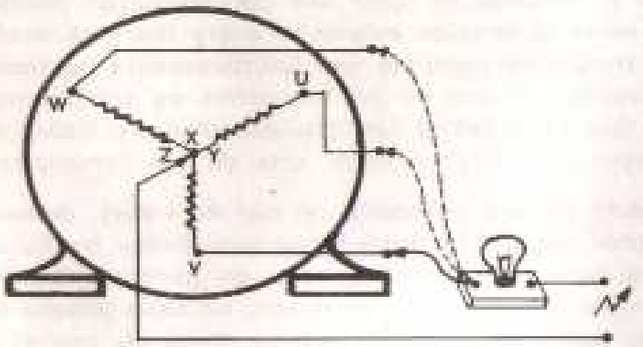


Fig. 61. — Comprobación de la interrupción de fases, haciendo uso de la lámpara de prueba, para el caso de conexión en estrella.

Si las fases no están interrumpidas, la lámpara se encenderá en cada uno de los tres ensayos. Si en alguna de las pruebas no se enciende la lámpara, la fase interrumpida es la que, en ese ensayo, se encuentra conectada a los extremos de la lámpara de prueba.

Si la conexión del arrollamiento es en triángulo, se abren las tres fases y se ensayan una a una (fig. 62) con la lámpara, que no se encenderá cuando la fase ensayada esté interrumpida.

Si los devanados parciales constasen de ramas en paralelo, antes de ensayar con la lámpara es necesario desempalmar todas las conexiones en paralelo e investigarlas separadamente.

Determinada cuál es la fase cortada, hay que localizar las bobinas o grupos interrumpidos. Para ello, manteniendo uno de los extremos de la lámpara conectado a uno de los terminales de la fase interrumpida, se van tocando, una a una y ordenadamente, todas las conexiones de las bobinas y de los grupos de bobinas de dicha fase.

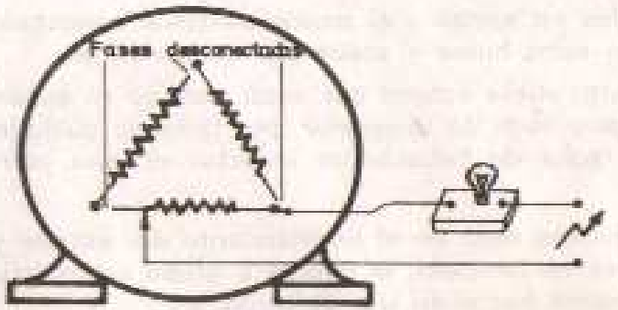


Fig. 62. — Comprobación de la interrupción de fases, haciendo uso de la lámpara de prueba, para el caso de conexión en triángulo. Es necesario abrir antes las tres fases, deshaciendo sus conexiones mutuas.

Si la lámpara se enciende al tocar determinada conexión, y permanece apagada al tocar la conexión siguiente, la bobina o grupo existente entre las dos conexiones citadas contiene la interrupción.

Se continúan ensayando los restantes grupos o bobinas de la fase cortada, hasta tener la seguridad de que no existen más interrupciones y de que las conexiones están bien soldadas.

Si se localiza exactamente el punto de interrupción, y es accesible, se puede reparar la rotura. En general, será necesario sustituir las bobinas cortadas, o rebobinar el motor.

Advertencia: Siempre que se verifiquen ensayos con la lámpara de prueba, es necesario comprobar que dicha lámpara no está fundida y que su circuito no está interrumpido.

(C) *Bobina, o grupo, en cortocircuito:*

Si el arrollamiento del estator tiene una bobina cortocircultada, el motor no podrá arrancar en parado. Si la bobina en cortocirculto está

en el rotor, el motor puede arrancar, pero lo hará bruscamente, con ruido y pudiéndose apreciar una gran oscilación de la corriente medida en el estator, aparte de otras irregularidades de funcionamiento.

Si esta avería se presenta durante el funcionamiento del motor, se caracteriza por ocasionar marcha ruidosa (zumbido típico), disminuir la potencia, calentamiento en vacío y olor a quemado.

Si los fusibles no saltan y el motor continua conectado a la red, el arrollamiento echa humo y acaba por carbonizarse.

El cortocircuito suele ocurrir por estar dañado el aislamiento de los hilos, desgracia fácil de ocasionar, por falta de cuidado e impericia, cuando los lados de bobinas se insertan en sus correspondientes ranuras.

Si el cortocircuito está en el arrollamiento del estator y éste carece de conexiones en paralelo, la bobina o grupo cortocircuitados se localiza fácilmente haciendo uso del zumbador.

Dicho instrumento consiste en una bobina de gran número de espiras, arrollada alrededor de un núcleo de chapas de hierro.

En el ensayo, se conecta el zumbador a la red (110 V, por ejemplo) y se apoya el núcleo sobre la ranura del estator (el rotor se ha extraído previamente) que alberga uno de los lados de la bobina a comprobar (fig. 63). Encima de la ranura que encierra el otro lado

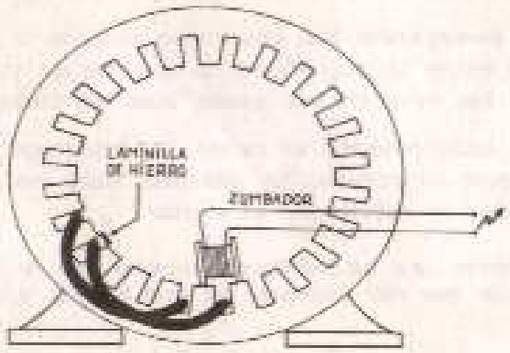


Fig. 63. — Determinación de la existencia de cortocircuitos en el arrollamiento del estator, con ayuda del zumbador y de una laminilla metálica, que vibrará al detectar cortocircuito.

de la bobina ensayada, se dispone una lámina de hierro (por ejemplo, una hoja de sierra). Si la bobina analizada está en cortocircuito, la cinta metálica vibrará.

El zumbador se va trasladando, ordenadamente, por todas las ranuras del estator, mientras que la cinta metálica se coloca cada vez sobre la ranura que contiene el otro lado de la bobina a ensayar.

Advertencia: Hay que llevar cuidado con seguir el paso del devanado de las bobinas, sobre todo si éste no es constante.

Si el estator está en orden, se puede comprobar la existencia de un cortocircuito en el rotor sin necesidad de desmontar la máquina.

Para ello se aplica una tensión trifásica moderada en los terminales del estator y, estando el rotor sin cortocircuitar (escobillas levantadas), se mide la tensión existente entre los tres anillos rozantes. Si las tres tensiones medidas son prácticamente iguales entre sí, no hay cortocircuito; si una de las tensiones es sensiblemente inferior a las otras dos (que deben ser iguales entre sí), habrá cortocircuito. Si el cortocircuito fuese franco, una de las tensiones sería nula.

El mencionado ensayo se repite un par de veces, después de haber girado el rotor hasta que tome otras posiciones frente al estator. El valor de las tensiones medidas será, en general, diferente en cada ensayo; pero si el rotor está en orden, en cada prueba se obtendrán valores muy aproximadamente iguales entre sí; por el contrario, si hay cortocircuito, en cada prueba se medirá una tensión sensiblemente inferior a las otras dos, tensión que corresponderá a la fase en cortocircuito.

Si el rotor presentara cortocircuito, hay que localizar la bobina o grupo cortocircuitados, lo que puede efectuarse con el zumbador, de modo análogo al explicado para el estator.

Insistimos en que el método del zumbador solamente es aplicable cuando las bobinas y grupos de bobinas están conectados en serie. Si existiesen conexiones en paralelo, éstas *se deben desempalmar* antes de realizar el ensayo con el zumbador.

Si las bobinas cortocircuitadas se hubieran carbonizado, sería posible reconocerlas a simple vista, por su tonalidad más oscura; en este caso, no sería necesaria otra comprobación.

Para localizar bobinas cortocircuitadas, cabe emplear, también, un método drástico que consiste en *quemar el defecto;* para ello, se mantiene el motor bajo tensión (no exagerada) durante cierto tiempo. Entonces, además de que las bobinas en cortocircuito se pueden reconocer porque humean y huelen a quemado, cabe distinguirlas al tacto, ya que se calientan mucho y rápidamente. Desde luego, este método de localización estropea todavía más el arrollamiento.

Si el arrollamiento no está quemado, y el cortocircuito se ha localizado con exactitud, y es fácilmente accesible, cabe una reparación a base de aislar bien la zona afectada.

Si la bobina está quemada, habrá de ser sustituida por otra nueva. Cuando se quema un grupo entero de bobinas, en general, se decide rebobinar todo el arrollamiento.

(D) *Barras del rotor flojas:*

En el caso de que el rotor tenga este defecto, producirá un sensible ruido durante su marcha, el motor apenas dará potencia y hasta se podrán observar chispas entre las barras y los aros o discos de cortocircuito de la jaula de ardilla. Si el defecto es muy acusado, el motor tendrá dificultades en el arranque, o incluso no girará.

Las barras flojas o sueltas se localizan, a veces, a simple vista o porque es posible moverlas a mano. Si existen dudas sobre si un rotor tiene este defecto, pueden localizarse las barras defectuosamente soldadas, mediante un detector de cortocircuitos, dispositivo análogo al zumbador.

Así, el rotor se coloca sobre el detector (fig. 64) que se conecta a la red. Entonces, se pasa una cinta metálica sobre cada ranura; la lámina de hierro vibrará cuando esté situada sobre barras *bien* soldadas, y no acusará una vibración persistente, o no vibrará, sobre las barras flojas o sueltas. La operación se repite para varias posiciones del rotor (girándolo sobre el núcleo de chapas magnéticas del detector), hasta haber comprobado todas las barras.

También pueden localizarse las barras defectuosamente soldadas, con el zumbador descrito en (C). Para ello, se coloca el zumbador sobre una ranura cualquiera, y se pasa la cinta metálica sobre cada una de las ranuras restantes: la cinta solamente vibrará cuando esté situada encima de una barra *bien* soldada. La operación se repite disponiendo el zumbador sobre otra ranura.

La reparación de un rotor que tiene barras flojas o sueltas, consiste en verificar una correcta soldadura de las barras mal soldadas.

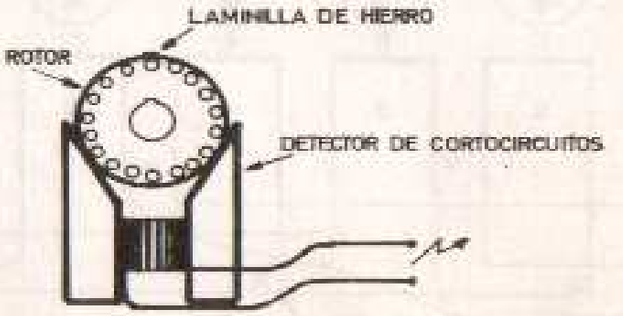


Fig. 64. — Detección de barras flojas o sueltas en el rotor.

En general, la soldadura debe ser practicada por personal especializado.

(E) *Conexiones interiores equivocadas:*

El arrollamiento trifásico alojado en las ranuras del estator de un motor asincrónico, tiene por misión generar un campo magnético giratorio simétrico, que es el que arrastra al rotor obligándole a seguirle en su movimiento circular (cap. V, § 7 de la 1.ª parte).

Si alguna de las conexiones entre grupos de bobinas se han practicado al revés, o equivocadamente se ha invertido alguna de las fases, tomando el terminal *U, V* o *W* por el *X, Y* o *Z*, respectivamente, y viceversa, el campo giratorio resultará deformado y, en consecuencia, la máquina no podrá arrancar, o marchará irregularmente.

La localización de los grupos o fases invertidas se realiza fácilmente con ayuda de la aguja magnética.

Para ello, si la conexión es en estrella, ensayaremos una tras otra las tres fases, del modo que se expone para la fase *U-X*:

Conectamos el punto neutro (*XYZ*) a uno de los bornes de una fuente de corriente continua de baja tensión (una pila o una batería), mientras que el borne restante lo conectamos al terminal *U* (fig. 65).

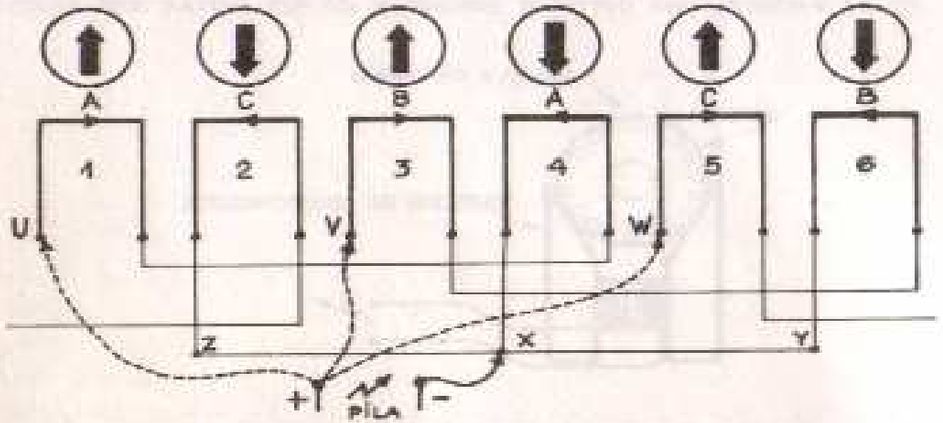


Fig. 65. — Localización de grupos o fases invertidos, con la aguja magnética, para el caso de conexión en estrella y polos alternados. El lector puede comprobar que el caso de polos consecuentes se analiza del mismo modo.

En estas condiciones, por la fase *U-X* pasa una corriente continua, de tal manera que cada grupo de bobinas constituye un polo magnético, norte o sur.

Así, pues, al pasar la aguja magnética (brújula) frente a cada grupo, señalará un norte o un sur, según la polaridad del grupo. Con una tiza, escribiremos el resultado (*N* o *S*) en el núcleo de chapas, bajo el centro de cada grupo, que es donde la aguja mostrará mayor desviación.

Como se ha dicho, concluido el análisis de todos los grupos de una fase, se ensaya la segunda fase, y después la tercera.

Si la conexión es en triángulo, abriremos uno cualquiera de los vértices, y aplicaremos la fuente de corriente continua entre los terminales separados (fig. 66).

Seguidamente, pasaremos la aguja magnética frente a todos los grupos de bobinas de las tres fases del arrollamiento, anotando las lecturas con una tiza, de modo análogo al citado anteriormente.

Si el arrollamiento está en orden, la lectura ordenada de las anotaciones escritas sobre el núcleo nos mostrará sucesivamente polos de distinto signo: N - S - N - S - N - S ... Además, se tendrá que el número de polos norte será el mismo que el de polos sur, y el número total de polos escritos, sumados los norte con los sur, será igual a tres veces el número de polos del motor.

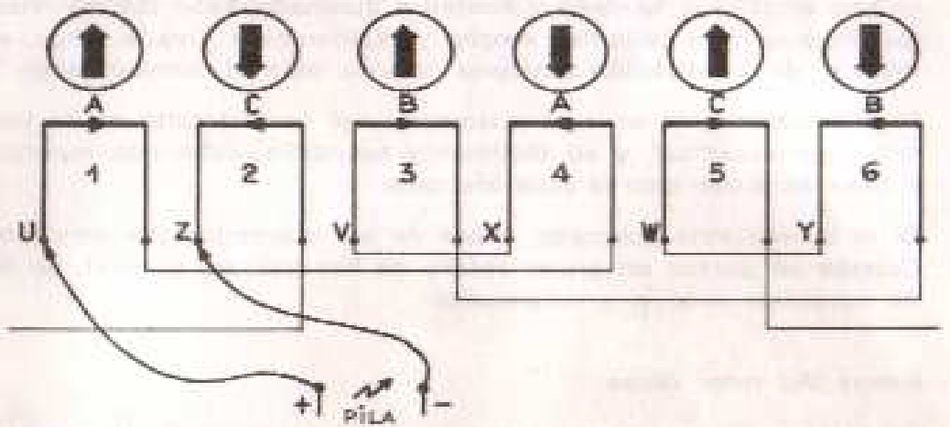


Fig. 66. — Localización de grupos o fases invertidos, con la aguja magnética, para el caso de conexión en triángulo y polos alternados. El lector puede comprobar que el caso de polos consecuentes se analiza del mismo modo.

Los errores de inversión se localizarán como sigue:

— Grupo invertido:

Un grupo que esté conectado al revés señalará una polaridad contraria a la que debería manifestar, de modo que será fácilmente localizado por la simple lectura de los polos anotados. Por ejemplo, si la lectura proporciona: N - S - N - S - N - *N* - N - S - N - S - N - S, el polo escrito en letra cursiva debería ser un sur, en vez de un norte; así, el grupo bajo el que la aguja marcó ese norte, está invertido.

— Fase invertida:

También se deduce directamente de la lectura de los polos anotados. Por ejemplo, en un motor trifásico de cuatro polos con una fase invertida, la aguja magnética daría: N-N-N-S-S-S-N-N-N-S-S-S. En un motor trifásico de dos polos, con una fase invertida, la aguja magnética daría: N-N-N-S-S-S.

En general, cuando una de las fases está invertida, los polos aparecen siempre agrupados de tres en tres (en motores trifásicos).

Con ayuda de la aguja magnética se pueden advertir, asimismo, los grupos en cortocircuito, pues en este caso la brújula no sufrirá desviación alguna.

Los ensayos expuestos para el arrollamiento trifásico del estator pueden hacerse extensivos al arrollamiento trifásico del rotor de anillos rozantes. La alimentación de corriente continua de baja tensión se hará a través de los anillos rozantes (escobillas levantadas).

Advertencia: Algunos arrollamientos de rotores de máquinas antiguas (de estator trifásico) constaban solamente de dos fases. En todo caso, el número de polos del arrollamiento del rotor debe coincidir con el número de polos del arrollamiento del estator.

F) *Arrollamiento con un contacto a masa:*

Esta avería se puede poner en evidencia mediante la lámpara de prueba, siendo el primer ensayo que debe verificarse en un motor averiado, ya que es necesario reparar esta avería antes de proceder a otros ensayos. Para el ensayo, conectamos uno de los extremos de la lámpara de prueba, sucesivamente, con cada uno de los tres terminales libres del arrollamiento trifásico, mientras que la otra línea de la lámpara se mantiene fija en contacto con la carcasa del motor.

Si la lámpara se enciende en alguna de las pruebas, hay uno o más contactos con la masa.

Si la avería no se localiza a simple vista, se abren todas las fases hasta que los seis terminales queden separados, y se aislan tres de ellos (por precaución), por ejemplo los *X*, *Y* y *Z*. Entonces, con la lámpara de prueba se analiza cada fase, tocando con uno de los extremos de la lámpara, sucesivamente, los terminales *U*, *V* y *W*, mientras que el otro extremo de la lámpara se mantiene fijo en contacto con la carcasa del motor. Si la lámpara se enciende, hay contacto a masa, y queda definida la fase o fases averiadas.

Determinada qué fase tiene contacto a masa, hay que localizar la bobina o grupo donde tiene lugar el contacto. Para ello, se desconectan todas las conexiones del devanado parcial correspondiente, ensayando por separado (de modo análogo al empleado para cada fase) cada bobina o grupo de bobinas.

Localizada la bobina o grupo averiados, hay que reparar la avería, o mejor sustituir la bobina o grupo, renovando el aislamiento de las ranuras y eliminando la causa que haya podido originar la avería (por ejemplo, podría haber sido ocasionada porque uno de los discos de chapa se había deslizado cortando el aislamiento de la ranura y el esmalte del hilo; en este caso, habrá que empujar el disco hasta su posición correcta, o limar el saliente).

A veces, el contacto a masa tiene lugar en alguna de las cabezas de bobinas, si por sus dimensiones sobresalen mucho de las ranuras, y rozan con los escudos, o con los pernos de sujeción de éstos.

En este caso, estando conectada la lámpara de prueba, se producirán oscilaciones luminosas al mover la cabeza de la bobina averiada, y hasta quizá sean visibles pequeñas chispas en el punto de contacto a masa.

A menudo, el defecto se presenta en el extremo de los lados de las bobinas, donde comienzan a doblarse para formar la cabeza, y se produce porque el canto agudo de las ranuras lastima el esmalte del hilo, sea porque los cajetines del aislamiento de las ranuras son demasiado cortos, sea porque se han deslizado los cajetines hacia uno de los lados, o porque se han estropeado.

Otras veces, la avería se presenta porque, por descuido o impericia, alguno de los lados de bobinas no quedaron dentro del cajetín de aislamiento, sino que se deslizaron afuera, quedando en contacto directo con la parte metálica de la máquina. En este caso, en cuanto el esmalte se pierde, se forma un buen contacto a masa.

Como siempre que hay que reparar o sustituir bobinas, hay que decidir si no resultaría más seguro y conveniente un rebobinado total.

(G) *Estator conectado en estrella en vez de en triángulo.*
Ensayo para determinar la designación de seis terminales:

Cada motor necesita para su correcto funcionamiento una determinada tensión por fase. Si, por ejemplo, un motor trifásico exige una tensión de 220 V por fase, y se conecta a una red trifásica de 220 V, el arrollamiento del estator de dicho motor deberá conectarse en triángulo, para la marcha de régimen. Si lo conectáramos en estrella, la tensión existente en cada fase sería solamente de $220/\sqrt{3}=127$ V, de modo que, aparte de otras posibles anomalías, la potencia del motor bajaría considerablemente al crecer la carga aplicada.

En cada caso, al conectar un motor trifásico a la red, hay que atender a la tensión por fase que requiere el motor para su correcto funcionamiento a la velocidad de régimen.

La comprobación de si un motor está conectado en estrella o lo está en triángulo es sumamente sencilla si se conocen las designaciones de los seis terminales, y éstas son correctas. Basta comprobar que, en estrella, estarán unidos los terminales *X*, *Y* y *Z*, mientras que los *U*, *V* y *W* son los que irán, respectivamente, a las fases *R*, *S* y *T* de la red. En cambio, en la conexión en triángulo, se comprobará que los terminales *U*, *V* y *W* estarán unidos, respectivamente, a los *Z*, *X* e *Y*.

Si a la caja de bornes de un motor trifásico llegan solamente tres terminales, es que éstos serán *U*, *V* y *W*, mientras que los *X*, *Y* y *Z* se habrán dejado en el interior del motor formando el punto neutro (*XYZ*); o sea, el motor estará conectado en estrella.

Puede ocurrir que ninguno de los terminales del arrollamiento trifásico esté designado, o que se tengan dudas respecto a la veracidad de la designación, en cuyo caso hay que determinar correctamente los nombres de los terminales de las fases, y el orden de éstas.

Para ello, como primer paso, se averigua con la lámpara de prueba qué dos terminales corresponden a cada fase. Esto es bien sencillo: conectamos uno de los extremos de la lámpara a un terminal cualquiera y con la otra línea tocamos los cinco terminales restantes; cuando se encienda la lámpara, los terminales en contacto pertenecen a una misma fase; continuamos el ensayo hasta separar entre sí las tres fases.

Resta ahora determinar los principios *U*, *V* y *W*, y los finales *X*, *Y* y *Z* de las tres fases. Para ello, operamos como sigue:

Escogemos una fase cualquiera y la consideramos como fase *A*, designando uno de sus terminales con *U* y el otro con *X*, a libre elección. Quedan cuatro terminales: a dos cualquiera de una misma fase los llamamos *m* y *n*, perteneciendo a la fase que llamamos *B*; a los dos restantes, los designamos por *p* y *q*, pertenecientes a la fase *C*.

Para evitar confusiones, escribimos las designaciones anteriores sobre una cinta adhesiva que pegaremos en el correspondiente cable.

Seguidamente, aplicamos una tensión monofásica conocida entre los terminales *U-X* de la fase 1.

A continuación, probamos de unir el terminal *X* con un terminal de la fase *B* y otro de la fase *C*, de tal modo que la tensión medida entre los dos terminales que quedan sin conectar sea nula, y que la tensión medida entre *U* y cada terminal no conectado sea igual a 1,5 veces la tensión conocida aplicada entre *U-X* (fig. 67).

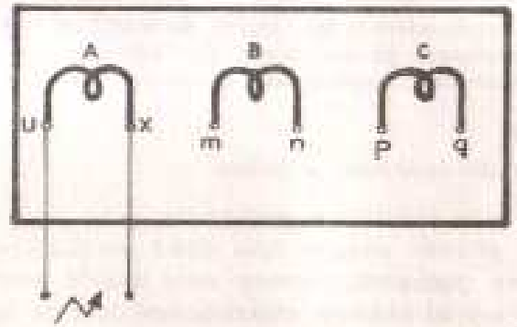


Fig. 67.—Determinación de la designación correcta de seis terminales sin nombre. Resumen de la prueba:
1. Con la lámpara de pruebas se averigua qué dos terminales corresponden a cada fase, y dos cualquiera de ellos se designan con U — X.
2. Entre U y X se aplica una tensión monofásica conocida. Se une X con un terminal de B y otro de C de modo que la tensión medida entre los dos terminales restantes sea nula y la tensión entre U y cada terminal no conectado sea igual a 1,5 veces la tensión monofásica aplicada. Se prueba hasta conseguir lo dicho.
3. Los terminales libres son V y W. Se ordenarán para que respectivamente unidos a S y T se obtenga el sentido de giro deseado.

Una vez se ha conseguido esto (lo que necesariamente tiene que suceder, lo más tarde tras cuatro pruebas), los terminales libres son precisamente *V* y *W*, con lo que también quedan definidos los correspondientes *Y* y *Z*.

Si el sentido de giro del motor no está expresamente indicado en la máquina, según las normas debe ocurrir que al conectar ordenadamente los terminales *U*, *V* y *W* del motor con los *R*, *S* y *T* de la red trifásica, el motor gire hacia la derecha, visto desde el lado de la transmisión.

Si el motor gira en el sentido opuesto, se cambiarán las designaciones *V* e *Y* por *W* y *Z*, respectivamente.

(H) *Interrupción de alguna conexión en paralelo:*

Si esta avería se produce, el motor emite un característico ronquido durante su funcionamiento, aparte de que se observa una alteración en la corriente de las fases afectadas, y de que la potencia del motor queda considerablemente disminuida.

Por medición de la resistencia óhmica de las tres fases por separado (si la conexión es en estrella, se abre el punto neutro), se pondrá de manifiesto que la resistencia de la fase que contiene la interrupción de una o más ramas en paralelo, es superior a la resistencia medida en las fases intactas.

Si la interrupción no se debe a un mal contacto en la conexión, lo mejor es desempalmar todas las conexiones en paralelo, de la fase o fases afectadas, y proceder al ensayo de cada rama por separado, de modo semejante al expuesto en (B) para las bobinas y grupos.

(I) *Excesiva frecuencia de conexión y desconexión del motor a la red:*

Ya hemos dicho repetidas veces que la corriente de arranque de un motor trifásico es muy superior a la corriente que circula cuando el motor alcanza la velocidad de régimen.

La elevada corriente de arranque origina un calentamiento rápido de la máquina, pero si ésta alcanza normalmente la velocidad de régimen, y funciona durante bastante tiempo a dicha velocidad, se enfriará paulatinamente, sin presentar ningún problema de calentamiento que pueda achacarse a la corriente de arranque.

Sin embargo, si tras un corto intervalo de funcionamiento a la velocidad de régimen, el motor se desconecta y se vuelve a conectar, y ello se repite frecuentemente, la corriente de arranque pasará por el motor con excesiva frecuencia, dando origen a un sobrecalentamiento que puede ser peligroso.

Si el sobrecalentamiento de un motor es debido a esta causa, y el motor es de jaula de ardilla, cabe transformar el motor en otro de anillos rozantes, bobinando el rotor y dimensionando cuidadosamente las resistencias del reóstato de arranque, ya que esto último permite aminorar considerablemente el calentamiento del motor durante el arranque.

Naturalmente, otra solución al problema es acudir a un motor de mayor potencia.

(J) *Mala elección de la relación de ranuras rotor/estator:*

Muchos de los ruidos de difícil localización, así como otras importantes anomalías (dificultades en el arranque, baja velocidad, etc.) pueden ser debidos a una desafortunada elección, por parte del constructor, de la relación del número de ranuras del rotor y del estator (ver cap. XII, § 11, 1.ª Parte).

Si las anomalías que presenta el motor no pueden ser atribuidas a ninguna de las causas anteriormente citadas, hay que comprobar si la relación de ranuras rotor/estator está entre las favorables.

Si está claramente entre las desfavorables, habrá que escoger otro rotor cuyo número de ranuras sea conveniente frente al número de ranuras que tiene el estator.

13. Resumen conjunto de averías

La tabla 5 expuesta a continuación, obtenida del librito de instrucciones de servicio de SIEMENS para motores trifásicos cerrados, con rotor de jaula de ardilla, proporciona una excelente visión de conjunto de las más frecuentes causas de averías, y de las medidas a tomar para su reparación.

Tabla 5 en la página siguiente

Tabla 5: Resumen de averías y de las medidas a tomar para su eliminación

Causa / Averías eléctricas	La tensión de la red y la frecuencia son excesivamente reducidas en la misma proporción	Frecuencia de maniobra demasiado elevada	Falso conexión Conexión triángulo en lugar de conexión estrella. Conexión estrella en lugar de conexión triángulo	Falso empalme del interruptor estrella-triángulo	Sobrecarga	Interrupción en un punto de empalme o en el devanado	Cortocircuito entre espiras en el devanado del estator	Cortocircuito en el devanado o contacto a tierra	El motor o el ventilador rozan	Ajuste o medición falsos de la protección térmica de sobrecarga	Vías del aire de refrigeración obstruidas	Descenso de la tensión durante la carga
El motor no marcha en vacío o lo hace con dificultad				■		△	□		○			◆ ●
El motor no marcha con carga o lo hace con una velocidad de rotación reducida				■	◆	△	□	▼	○			◆ ●
Velocidad de rotación demasiado reducida, fuerte calentamiento	◆				◆			▼	○			
Fuerte calentamiento del devanado del rotor o del paquete de chapa		▲	■	■	◆	△	□	▼			⊙	◆ ●
Diferente intensidad de corriente en los conductores de empalme						△	□	▼				
No hay corriente en uno de los conductores de empalme						△						
Al conectar actúa la protección térmica contra sobrecargas		▲		■		△		▼		+		
Durante la carga disminuye la velocidad de rotación del motor, aumenta el deslizamiento			■	■	◆	△	□	▼				◆ ●
El motor zumba						△	□	▼				
La protección térmica contra sobrecargas se dispara durante el servicio	◆	▲	■	■	◆	△		▼		+	⊙	
Cojinetes demasiado calientes	◆	▲	■		◆							

Causa / Averías mecánicas	Falso colocación	Masa centrífuga en el rotor	Demasiada grasa en el cojinete		Cuerpos extraños en el cojinete	Holgura del cojinete demasiado pequeña	Holgura del cojinete excesiva	Defectos en las superficies de rodamiento	Montaje incorrecto, cojinete ladeado	La lubricación falta	Falsa alineación	La correa está demasiado tensa	Empuje axial excesivo	Entrehierro desigual
Vibraciones anómalas	◪	○									◐◐			○
Cojinetes demasiado calientes			×		◐	◪			○◐	◐	◐◐	◐◐	◐◐	
Cojinetes golpean					◐		◪	◐						
Cojinetes silban						◪			○◐					
Cojinetes se desgastan					◐			◐	◐	◐	◐◐	◐◐	◐◐	

- ● Emplear conductores de la red de mayor sección
- ▲ Prolongar el tiempo de refrigeración o reducir la frecuencia de maniobra
- ■ Rectificar la conexión
- △ Localizar la interrupción y eliminarla
- □ Localizar el cortocircuito entre espiras y eliminarlo o devanar de nuevo
- ○ Buscar las averías mecánicas y repararlas
- ▼ Comprobar si existen contactos entre espiras, con tierra o con masa y eliminarlos
- + Ajustar correctamente la protección térmica contra sobrecargas
- ◐ Cambiar los cojinetes y cambiarlos si hace preciso
- ◐ Alinear y acoplar de nuevo
- ◪ Cambiar los cojinetes
- ◪ Mejorar el fundamento
- × Quitar la grasa sobrante
- ⊙ Limpiar el motor
- ◆ Reducir la carga

Fig. 14
Averías, sus causas y medidas para eliminarlas

CAPITULO V

FACTOR DE BOBINADO

1. Introducción

En las máquinas eléctricas, el factor de bobinado es un importante término que interviene directamente en el cálculo.

El factor total de bobinado se obtiene como producto de varios factores parciales que dependen de la situación y distribución de las bobinas y grupos del arrollamiento en las ranuras de la máquina.

La teoría y cálculo exactos del factor de bobinado es tema fuera de las posibilidades del bobinador; por ello, no trataremos aquí de exponerlo en toda su complejidad. Sin embargo, es muy conveniente que el bobinador conozca la influencia que, sobre el funcionamiento de la máquina, ejerce la distribución de las bobinas, el acortamiento de paso y otras características del arrollamiento.

2. Influencia del factor de bobinado en el cálculo

El valor del factor de bobinado ξ (letra griega ksi) es siempre menor que la unidad, para cualquier arrollamiento práctico. En el cálculo de las máquinas eléctricas, el factor ξ aparece siempre multiplicando al valor ω (letra griega omega) del número de espiras por fase.

Por tanto, cuando un arrollamiento trifásico — con un factor de bobinado igual a ξ — consta de ω espiras por fase, la máquina se comporta en realidad como si tuviese solamente $\xi \cdot \omega$ espiras por fase; o sea, que el número efectivo de espiras por fase es siempre menor que las ω que tiene el arrollamiento.

Ejemplo:

El factor total de bobinado de un arrollamiento es $\xi = 0{,}940$. El número de espiras por fase es $\omega = 200$. A efectos de cálculo, dicha máquina se comporta como si su número de espiras por fase fuera, solamente:

$$\xi \cdot \omega = 0{,}940 \times 200 = 188$$

De lo anterior se desprende que cuanto menor es el factor del bobinado, menor resulta el número efectivo de espiras por fase. Puede ocurrir así que, si se modifica un arrollamiento, aunque se mantenga constante el número de espiras por fase, varíe el número efectivo de espiras por fase.

Ejemplo:

Sea un motor trifásico provisto de un arrollamiento con $\omega = 250$ espiras por fase, y factor de bobinado $\xi = 0{,}980$. Supongamos que, manteniendo el mismo número de espiras por fase, modificamos el arrollamiento (por ejemplo, acortando el paso) de manera que el nuevo factor de bobinado sea $\xi' = 0{,}930$.
Ello significa que el número efectivo inicial de espiras por fase:

$$\xi \cdot \omega = 0{,}980 \times 250 = 245$$

variará hasta tomar el valor:

$$\xi' \cdot \omega = 0{,}930 \times 250 = 232{,}5$$

Naturalmente, el hecho de que el motor tenga ahora 12,5 espiras menos por fase puede tener consecuencias apreciables en el comportamiento del motor.

En general, para aprovechar al máximo la capacidad de una máquina eléctrica, conviene que el factor de bobinado sea lo más próximo posible a la unidad, con el fin de que no se rebaje sensiblemente el número de espiras por fase.

Existen, sin embargo, una serie de razones de consideración que inclinan a tomar ciertas medidas sobre los arrollamientos (tales como: acortar el paso del devanado, o escoger una anormal distribución de las bobinas, etcétera), que si bien conducen a una reducción del valor del factor de bobinado, por otra parte proporcionan ventajas importantes (por ejemplo: mejora del arranque, posibilidad de conexiones en paralelo, etc.).

De todo lo expuesto, el taller de bobinado debe extraer la importante conclusión:

El factor de bobinado interviene sensiblemente en el cálculo de una máquina eléctrica. Ante cualquier modificación de las características originales de un arrollamiento, se debe atender a la posible variación del factor de bobinado y obrar en consecuencia (ver, además de éste, el cap. VI).

Modificar un arrollamiento sin pensar en compensar la posible variación del factor de bobinado, puede proporcionar desagradables sorpresas.

En lo que sigue, veremos cómo se modifica el factor de bobinado al variar algunas de las características del arrollamiento.

3. Factores de los que depende el factor total de bobinado

El factor total de bobinado se obtiene siempre como resultado del producto de varios factores parciales. Entre éstos mencionaremos los tres más importantes:

— Factor de acortamiento del paso.
— Factor de distribución.
— Factor de acortamiento de zona.

A continuación, iremos analizando, a nivel de taller, cada uno de los factores citados.

4. Factor de acortamiento del paso

El acortamiento del paso del devanado ya conocemos en qué consiste: En vez de tomar para una bobina el ancho que va de polo a polo (o sea, medido en ranuras: $N/2p$), se acorta el ancho en una o más ranuras.

Existen tres buenas razones, entre otras, que apoyan la ejecución de un paso acortado, en vez de tomar el paso diametral:

— Se consigue una reducción de la longitud total del hilo conductor empleado y, en consecuencia (prescindiendo del ahorro), disminuye la resistencia eléctrica (y la caída de potencial de cada fase del arrollamiento).

— Se mejoran las condiciones de funcionamiento del motor, especialmente en lo que al arranque se refiere. Incluso, en algunos casos, resulta ser la única solución posible a los problemas de arranque.

— Se facilita sensiblemente la inserción de bobinas en las ranuras, sobre todo en máquinas bipolares.

Como contrapartida de estas ventajas, está el inconveniente de que todo acortamiento de paso significa una disminución del número efectivo de espiras por fase. Cuanto más se acorta el paso, tanto menor resulta el factor de acortamiento del paso y, por ello, tanto menor resulta el número efectivo de espiras por fase.

La figura 68 explica muy intuitivamente la razón por la que una bobina con paso acortado representa una disminución del número efectivo de espiras por fase, frente a una bobina de paso diametral. En efecto, la bobina de paso diametral abarca todo el flujo entre polos, mientras que la bobina de paso acortado deja perder parte de dicho flujo.

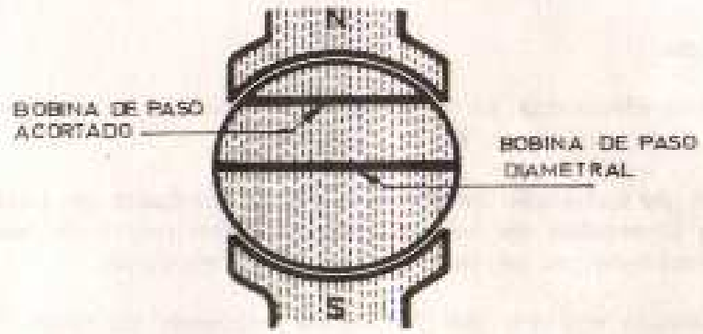


Fig. 68. — La bobina de paso diametral abraza todo el flujo magnético que va de polo a polo de la máquina. Por el contrario, una bobina cuyo paso es acortado solamente abraza una parte de dicho flujo. Cuanto más acortado es el paso, menos se aprovecha el flujo magnético, de modo que la máquina se comporta como si tuviese menos conductores por bobina.

De lo examinado se puede sacar la conclusión de que nunca habrá que acortar el paso del devanado exageradamente. Por otra parte, en casos de dificultad en el arranque de motores, aunque todo acortamiento de paso — por reducido que sea — puede considerarse como favorable al arranque, no bastará ejecutar cualquier acortamiento, sino que habrá de realizarse el acortamiento más favorable. Aquí surge la dificultad de determinar cuál es este acortamiento más conveniente.

Evidentemente, sólo con buenos conocimientos teóricos se puede operar con seguridad en la elección del paso más conveniente. Sin embargo, a título de orientación, se pueden dar algunas normas útiles para el taller; en este sentido debe tomarse lo que sigue.

5. Paso acortado más conveniente

En primer lugar, es necesario saber determinar con seguridad el paso diametral. Por definición, el paso diametral (medido en ranuras) es el cociente del número total N de ranuras y el número total $2p$ de polos, o sea: $N/2p$. Para calcularlo basta, pues, conocer el número de ranuras y el de polos de la máquina.

Ejemplo:

Calcular el paso diametral para una bobina de una máquina con 24 ranuras y 4 polos. Será:

$$N/2p = 24/4 = 6 \text{ ranuras},$$

es decir, $y = 1 : 7$.

Ejemplo:

Calcular el paso diametral correspondiente a las bobinas del arrollamiento de una máquina con 30 ranuras y 4 polos.

Será:

$$N/2p = 30/4 = 7{,}5 \text{ ranuras},$$

es decir que, en este caso, por ser el paso diametral un número fraccionario, no podría ejecutarse.

Se ejecuta un paso acortado cuando se toma un paso menor que el diametral. Por ejemplo, si el paso diametral es de 6 ranuras (o sea: $y = 1 : 7$) y el paso se toma de 5 ranuras (o sea: $y = 1 : 6$), se habrá ejecutado un paso acortado en una ranura.

El cociente entre el paso acortado y el paso diametral (medidos ambos en ranuras), lo llamaremos nosotros *paso relativo*, y será el valor que nos oriente sobre la magnitud del acortamiento verificado. Cuanto más acortado sea el paso escogido, tanto menor será el paso relativo.

Ejemplo:

Sea el arrollamiento de una máquina bipolar con 30 ranuras. Calcular los pasos relativos para un acortamiento de paso de dos ranuras, y para otro acortamiento de tres ranuras.

El paso diametral correspondiente es:

$$N/2p = 30/2 = 15 \text{ ranuras}.$$

El paso acortado en dos ranuras abrazará $15 - 2 = 13$ ranuras, de modo que el paso relativo correspondiente será:

$$\text{Paso relativo} = 13/15 = 0{,}866.$$

El paso acortado en tres ranuras abrazará $15 - 3 = 12$ ranuras, de modo que el paso relativo correspondiente será:

$$\text{Paso relativo} = 12/15 = 0{,}800.$$

Ejemplo:

Sea el arrollamiento de una máquina de 6 polos con 42 ranuras. Calcular los pasos relativos para un acortamiento de paso de una ranura, y para otro acortamiento de dos ranuras.

El paso diametral correspondiente es:

$$N/2p = 42/6 = 7 \text{ ranuras}.$$

El paso acortado en una ranura abrazará $7 - 1 = 6$ ranuras, de modo que el paso relativo correspondiente será:

$$\text{Paso relativo} = 6/7 = 0{,}857.$$

El paso acortado en dos ranuras abrazará $7 - 2 = 5$ ranuras, de modo que el paso relativo correspondiente será:

$$\text{Paso relativo} = 5/7 = 0{,}714.$$

Determinado el paso relativo, admitiremos (según el prof. *Nürnberg*) que el paso acortado más conveniente será el que proporcione un paso relativo comprendido entre los valores límites: 0,800 y 0,833. En general, nunca se tomará un acortamiento de paso que proporcione un paso relativo menor de 0,800. No hay inconveniente de tomar un paso acortado que proporcione un paso relativo superior a 0,833, si bien no será el más conveniente.

Así, en el ejemplo anterior, para una máquina con 6 polos y 42 ranuras, se puede ejecutar un paso acortado en una ranura (paso relativo = 0,857), pero no se deberá realizar un paso acortado en dos ranuras (paso relativo = 0,714), porque se sale fuera de la zona conveniente y, además, daría un factor de acortamiento de paso demasiado reducido.

No siempre es posible, como se desprende del ejemplo analizado, ejecutar el paso acortado más conveniente. En estos casos, hay que aproximarse al paso más favorable, pero sin acortar tanto el paso que el paso relativo sea inferior al límite 0,800.

Ejemplo:

Calcular el paso acortado más conveniente para el arrollamiento de una máquina de 4 polos y 24 ranuras.

El paso diametral es:

$$N/2p = 24/4 = 6 \text{ ranuras}.$$

Un paso acortado en una ranura, proporcionaría un paso relativo:

$$\text{Paso relativo} = 5/6 = 0{,}833.$$

Un paso acortado en dos ranuras, proporcionaría un paso relativo:

$$\text{Paso relativo} = 4/6 = 0{,}666.$$

Por tanto, escogeremos el paso acortado en una ranura, o sea: $y = 1 : 6$.

Ejemplo:

Calcular el paso acortado más conveniente para el arrollamiento de una máquina de 8 polos y 39 ranuras.

El paso diametral es:

$$N/2p = 39/8 = 4{,}875 \text{ ranuras.}$$

Tomando como paso acortado el $y = 1 : 4$, se tendría un paso relativo:

$$\text{Paso relativo} = 4/4{,}875 = 0{,}820.$$

Tomando como paso acortado el $y = 1 : 3$, se tendría un paso relativo,

$$\text{Paso relativo} = 3/4{,}875 = 0{,}615.$$

Tomaremos, pues, el paso acortado $y = 1 : 4$.

Ejemplo:

Para el arrollamiento de una máquina bipolar con 51 ranuras, se desea saber el paso acortado más conveniente.

El paso diametral es:

$$N/2p = 51/2 = 25{,}5 \text{ ranuras.}$$

Se tiene:

Paso $y = 1 : 23$ ..... Paso relativo $= 22/25{,}5 = 0{,}862$.
Paso $y = 1 : 22$ ..... Paso relativo $= 21/25{,}5 = 0{,}823$.
Paso $y = 1 : 21$ ..... Paso relativo $= 20/25{,}5 = 0{,}784$.

De lo anterior deducimos que el paso acortado más conveniente es $y = 1 : 22$. Si no hubiesen razones que exigieran un paso tan acortado, podría tomarse el paso $y = 1 : 23$, u otro menos acortado; pero no es aconsejable tomar el paso $y = 1 : 21$, ni otros más acortados, por reducirse demasiado el factor de acortamiento del paso.

6. Factor de distribución

Cuando los conductores de una fase, en vez de situarlos concentrados en una única bobina (fig. 69), se reparten en un grupo de bobinas (fig. 70), se introduce un factor de distribución que representa una disminución del número efectivo de espiras por fase.

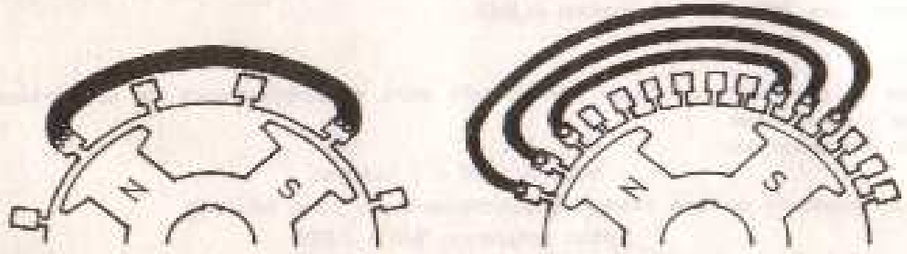


Fig. 69 (a la izda.). — Todos los conductores de una fase se concentran en una bobina. En este caso, las f.e.ms. generadas en cada conductor se suman aritméticamente, ya que están en fase. — Fig. 70 (a la derecha). — Los conductores de una fase se reparten entre varias bobinas de un grupo. En este caso, las f.e.ms. generadas en cada bobina no se suman aritméticamente, sino geométricamente, porque no están en fase. La suma aritmética es mayor que la geométrica, por lo que al repartir los conductores en varias bobinas la máquina se comporta como si tuviese menos conductores por fase.

Actualmente se ejecutan casi siempre arrollamientos que reparten los conductores en varias bobinas, principalmente porque de este modo se aprovecha mejor la superficie del estator (o rotor). De modo que en casi todos los arrollamientos hay que contar con dicho factor de distribución.

El factor de distribución depende del valor que toma el número q de ranuras por polo y fase ($q = N/2pm$), ya que q está directamente relacionado con el número de bobinas de que consta cada grupo (ver cap. VII, § 7 de la 1.ª parte), esto es, indica la magnitud de distribución de un devanado, en diversos grupos de varias bobinas.

Para cada número de polos dado, existe un único número N de ranuras para el que se cumple la condición $q = 1$; en estos pocos casos, el factor de distribución vale la unidad. Así:

Para 2 polos, $q = 1$ cuando $N = 6$ ranuras.
Para 4 polos, $q = 1$ cuando $N = 12$ ranuras.
Para 6 polos, $q = 1$ cuando $N = 18$ ranuras.
Para 8 polos, $q = 1$ cuando $N = 24$ ranuras.
Para 10 polos, $q = 1$ cuando $N = 30$ ranuras.
Para 12 polos, $q = 1$ cuando $N = 36$ ranuras.
Para $2p$ polos, $q = 1$ cuando $N = 6p$ ranuras.

En la mayoría de los arrollamientos prácticos, el factor de distribución es menor que la unidad. Cuanto mayor es el valor de q, tanto menor es el factor de distribución.

Sin embargo, teniendo en cuenta que para un arrollamiento trifásico con $q = 2$ resulta un factor de distribución igual a 0,966, y con $q = 20$ resulta un factor de distribución igual a 0,956, se comprende que — en los arrollamientos trifásicos — el factor de distribución no influye sensiblemente en el cálculo.

No se puede decir lo mismo para el caso de arrollamientos monofásicos, donde será necesario tener muy en cuenta el valor del factor de distribución.

7. Factor de acortamiento de zona

Se origina cuando, en el reparto de rayos de la estrella de ranuras, el número de rayos positivos se toma distinto del número de rayos negativos

El acortamiento de zona se realiza, en general, para poder verificar en el arrollamiento conexiones en paralelo, que no serían posibles con la distribución usual de rayos de la estrella de ranuras.

Veamos un ejemplo:

Sea un arrollamiento trifásico para una máquina de 4 polos con 18 ranuras. En la figura 71 se ha representado la correspondiente estrella de ranuras con el reparto usual de rayos. Existen aquí 3 rayos positivos y 3 rayos negativos para cada fase; en este caso, pues, no hay acortamiento de zona.

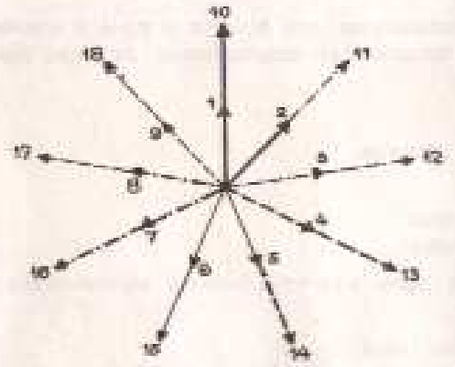


Fig. 71. — Estrella de ranuras para N = 18 y p = 2, con el reparto de rayos usual para m = 3. Cada fase consta de tres rayos positivos y tres rayos negativos (en arrollamientos a dos capas, del doble).

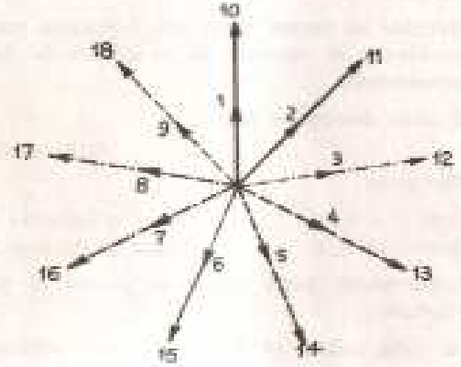


Fig. 72. — Estrella de ranuras para N = 18 y p = 2, con el reparto de rayos para m = 3 modificado. Para cada fase hay ahora cuatro rayos positivos y dos negativos (sólo se pueden ejecutar arrollamientos a dos capas).

Cualquier arrollamiento (sea de polos consecuentes o de polos alternados) ejecutado de acuerdo con este reparto de rayos, no admite conexiones en paralelo, como el lector puede deducir al escribir la sucesión de fases y de bobinas por fase (cap. XI).

La figura 72 representa la estrella de ranuras, para el mismo caso, pero habiendo tomado ahora un nuevo reparto de rayos: aquí se han escogido 4 rayos positivos y 2 negativos para cada fase. De acuerdo con este reparto de rayos, se pueden ejecutar arrollamientos a dos capas (a una capa no es posible) que admiten una rama en paralelo, según se deduce de la sucesión de fases y de bobinas por fase:

ACB	*ACB*	*ACB*	*ACB*
212	121	212	121

que indica claramente la repetición de la sucesión 212 - 121.

El arrollamiento ejecutado de acuerdo con este reparto de rayos, esté conectado en serie o en paralelo, presenta un acortamiento de zona que tiene como consecuencia inevitable la reducción del número efectivo de espiras por fase.

Como se ha dicho, con el acortamiento de zona se persigue — en la mayoría de los casos — ejecutar arrollamientos con posibilidad de conexiones en paralelo; pero, además, el acortamiento de zona puede — al igual que el acortamiento del paso del devanado — contribuir a mejorar las condiciones de arranque y funcionamiento del motor.

Esta importante cuestión la veremos seguidamente, si bien con las limitaciones que nos imponemos para que sea asequible a los talleres de bobinado.

8. El acortamiento de zona como medio para mejorar el arranque

Llamando Z a la diferencia entre el número de rayos positivos y negativos de la estrella de ranuras, definiremos un coeficiente — que llamamos *zona relativa* — por:

$$\text{Zona relativa} = \frac{N - Z}{N}$$

donde N es, como siempre, el número total de ranuras.

El valor de la zona relativa nos informará sobre la magnitud del acortamiento de zona. Cuando en la estrella de ranuras existe el mismo número de rayos positivos que negativos (como sucede siempre en el reparto usual de rayos), se tendrá que $Z = 0$, de modo que la zona relativa será la unidad. Por otra parte, cuando el valor de Z crece, la zona relativa disminuye, esto es, el acortamiento de zona se hace menor.

Es fácil comprobar la correspondencia entre acortamiento de zona y acortamiento de paso, y entre zona relativa y paso relativo. Esta similitud contribuye a la comprensión del acortamiento de zona.

Ocurre, sin embargo, que así como el paso del devanado se podía escoger con bastante libertad (sobre todo en arrollamientos con muchas ranuras y bajo número de polos), el acortamiento de zona viene casi siempre impuesto por el deseo de encontrar un arrollamiento con posibilidad de conexiones en paralelo, y — además — no existe tanta libertad para variar el reparto de rayos de la estrella como para escoger diferentes pasos acortados.

Al igual que para el paso relativo, el valor más conveniente de la zona relativa se encuentra comprendido entre 0,800 y 0,833. Y también: todo acortamiento de zona, no excesivo, contribuye a mejorar el arranque, pero (salvo fuerza mayor) no interesa que la zona relativa sea menor de 0,800, porque entonces el factor de acortamiento de zona es muy pequeño, de modo que el número efectivo de espiras por fase se reduce excesivamente.

Ejemplo:

Consideremos el reparto de rayos del caso de la figura 72. Como (por fase) el número de rayos positivos es 4 y el de rayos negativos es 2, se tiene que $Z = 4 - 2 = 2$, de modo que la zona relativa será:

$$\text{Zona relativa} = \frac{18 - 2}{18} = 16/18 = 0{,}888.$$

Este acortamiento de zona no es, pues, el más favorable teóricamente; pero sí en la práctica, ya que un acortamiento mayor, con 5 rayos positivos y 1 negativo ($Z = 5 - 1 = 4$), da una zona relativa:

$$\text{Zona relativa} = \frac{18 - 4}{18} = 14/18 = 0{,}777$$

excesivamente reducida, además de que el arrollamiento correspondiente a este caso no admite conexiones en paralelo.

9. Cálculo numérico del factor de bobinado

Hasta ahora no hemos hablado de cómo se calcula en cada caso el factor total de bobinado. Es importante distinguir que el paso relativo no es lo mismo que el factor del paso del devanado, y tampoco zona relativa es el factor de acortamiento de zona.

Sin embargo, conocido el paso relativo, se puede calcular fácilmente el factor de acortamiento del paso mediante la fórmula:

$$\text{Factor de acortamiento del paso} = \text{seno (paso relativo} \times 90^\circ)$$

De modo análogo, conocido el valor de la zona relativa se puede calcular fácilmente el valor del factor del acortamiento de zona, mediante:

$$\text{Factor de acortamiento de zona} = \text{seno (zona relativa} \times 90^\circ)$$

En cuanto al factor de distribución, podremos tomarlo aproximadamente igual al valor medio 0,960, siempre que se trate de arrollamientos trifásicos.

La tabla 6 sirve para determinar el valor de los senos de los ángulos, necesario para calcular los factores de acortamiento del paso del devanado y de zona.

Como ya hemos dicho, el factor del bobinado se obtiene por el producto de los factores parciales mencionados.

Ejemplo:

Calcular el factor total del bobinado para el arrollamiento con $N = 18$ y $2p = 4$ correspondiente al reparto de rayos de la figura 72, tomando el acortamiento de paso más conveniente.

El paso diametral es:

$$N/2p = 18/4 = 4{,}5 \text{ ranuras.}$$

Se tiene:

Paso $y = 1 : 5$ ..... Paso relativo $= 4/4{,}5 = 0{,}888$.
Paso $y = 1 : 4$ ..... Paso relativo $= 3/4{,}5 = 0{,}666$.

Tomaremos, pues, el paso $y = 1 : 5$, ya que el paso $y = 1 : 4$ resulta excesivamente acortado.

De este modo, el factor de acortamiento de paso, será:

$$\text{Factor acort. de paso} = \text{seno } (0{,}888 \times 90^\circ) = \text{seno } 80^\circ = 0{,}9848.$$

El valor del factor de distribución lo estimamos en 0,960.

El valor de la zona relativa se había calculado en 0,888 en el ejemplo del epígrafe anterior. Así, el factor de acortamiento de zona será:

$$\text{Factor acort. de zona} = \text{seno } (0{,}888 \times 90^\circ) = \text{seno } 80^\circ = 0{,}9848.$$

El hecho de que el paso relativo sea igual a la zona relativa es mera coincidencia, pero indica que — a efectos de mejorar el arranque — tanto da acortar el paso según $y = 1 : 5$ que realizar el acortamiento de zona según el reparto de rayos de la figura 72. Acortar la zona y el paso, en este caso, no significa mejorar doblemente el arranque; bastaría con una sola de las medidas. Sin embargo, el acortamiento de paso reduce la resistencia total de cada fase, y el acortamiento de zona permite ejecutar conexiones en paralelo. En este sentido son ambas medidas útiles.

El factor total del bobinado será:

$$\xi = \text{Factor total del bobinado} = 0{,}9848 \times 0{,}960 \times 0{,}9848 = 0{,}931.$$

Ello significa que si, por ejemplo, el número ω de espiras por fase fuera igual a 100, el número efectivo de espiras por fase sería solamente de 93,1. En el caso de modificación de las características originales de un arrollamiento, siempre hay que operar con el producto del número ω de espiras por fase (o el de conductores por ranura, que es un valor proporcional) y el correspondiente factor total del bobinado ξ.

Tabla 6 en la página siguiente →

Grados	SENOS 0′	10′	20′	30′	40′	50′	
0	0,00000	0,00291	0,00582	0,00873	0,01164	0,01454	89
1	0,01745	0,02036	0,02327	0,02618	0,02908	0,03200	88
2	0,03490	0,03781	0,04071	0,04362	0,04653	0,04943	87
3	0,05234	0,05524	0,05814	0,06105	0,06395	0,06685	86
4	0,06976	0,07266	0,07556	0,07846	0,08136	0,08426	**85**
5	0,08716	0,09005	0,09295	0,09585	0,09874	0,10164	84
6	0,10453	0,10742	0,11031	0,11320	0,11609	0,11898	83
7	0,12187	0,12476	0,12764	0,13053	0,13341	0,13629	82
8	0,13917	0,14205	0,14493	0,14781	0,15069	0,15356	81
9	0,15643	0,15931	0,16218	0,16505	0,16792	0,17078	**80**
10	0,17365	0,17651	0,17937	0,18224	0,18509	0,18795	79
11	0,19081	0,19366	0,19652	0,19937	0,20222	0,20507	78
12	0,20791	0,21076	0,21359	0,21644	0,21928	0,22212	77
13	0,22495	0,22778	0,23062	0,23345	0,23627	0,23910	76
14	0,24192	0,24474	0,24756	0,25038	0,25320	0,25601	**75**
15	0,25882	0,26163	0,26443	0,26724	0,27004	0,27284	74
16	0,27556	0,27843	0,28123	0,28402	0,28680	0,28959	73
17	0,29237	0,29515	0,29793	0,30071	0,30348	0,30625	72
18	0,30902	0,31178	0,31454	0,31730	0,32006	0,32282	71
19	0,32557	0,32832	0,33106	0,33381	0,33655	0,33929	**70**
20	0,34202	0,34475	0,34748	0,35021	0,35293	0,35565	69
21	0,35837	0,36108	0,36379	0,36650	0,36921	0,37191	68
22	0,37461	0,37730	0,37999	0,38268	0,38537	0,38805	67
23	0,39073	0,39341	0,39608	0,39875	0,40141	0,40408	66
24	0,40674	0,40939	0,41204	0,41469	0,41734	0,41998	**65**
25	0,42263	0,42525	0,42788	0,43051	0,43313	0,43575	64
26	0,43837	0,44098	0,44359	0,44620	0,44880	0,45139	63
27	0,45399	0,45658	0,45917	0,46175	0,46433	0,46690	62
28	0,46947	0,47204	0,47460	0,47716	0,47971	0,48226	61
29	0,48481	0,48735	0,48989	0,49242	0,49495	0,49748	**60**
30	0,50000	0,50252	0,50503	0,50754	0,51004	0,51254	59
31	0,51504	0,51753	0,52002	0,52250	0,52498	0,52745	58
32	0,52982	0,53238	0,53484	0,53730	0,53975	0,54220	57
33	0,54464	0,54708	0,54951	0,55194	0,55436	0,55678	56
34	0,55919	0,56160	0,56401	0,56641	0,56880	0,57119	**55**
35	0,57358	0,57596	0,57833	0,58070	0,58307	0,58543	54
36	0,58779	0,59014	0,59248	0,59482	0,59716	0,59949	53
37	0,60182	0,60414	0,60645	0,60876	0,61107	0,61337	52
38	0,61566	0,61795	0,62024	0,62251	0,62479	0,62706	51
39	0,62932	0,63158	0,63383	0,63608	0,63832	0,64056	**50**
40	0,64279	0,64501	0,64723	0,64945	0,65166	0,65386	49
41	0,65606	0,65825	0,66044	0,66262	0,66480	0,66697	48
42	0,66913	0,67129	0,67344	0,67559	0,67773	0,67987	47
43	0,68199	0,68412	0,68624	0,68835	0,69046	0,69256	46
44	0,69466	0,69675	0,69883	0,70091	0,70298	0,70505	**45**
45	0,70711						44
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	Grados
	COSENOS						

Grados	COSENOS 0′	10′	20′	30′	40′	50′	
0	1,00000	0,99999	0,99998	0,99995	0,99992	0,99988	89
1	0,99984	0,99980	0,99973	0,99965	0,99958	0,99950	88
2	0,99940	0,99928	0,99917	0,99905	0,99892	0,99878	87
3	0,99863	0,99848	0,99831	0,99814	0,99795	0,99776	86
4	0,99756	0,99735	0,99714	0,99692	0,99669	0,99644	**85**
5	0,99618	0,99594	0,99567	0,99539	0,99511	0,99482	84
6	0,99452	0,99421	0,99389	0,99357	0,99324	0,99289	83
7	0,99255	0,99219	0,99182	0,99144	0,99106	0,99067	82
8	0,99027	0,98986	0,98944	0,98902	0,98858	0,98814	81
9	0,98769	0,98723	0,98676	0,98629	0,98580	0,98531	**80**
10	0,98481	0,98429	0,98378	0,98325	0,98272	0,98218	79
11	0,98163	0,98107	0,98050	0,97992	0,97934	0,97875	78
12	0,97815	0,97754	0,97692	0,97629	0,97566	0,97502	77
13	0,97437	0,97371	0,97304	0,97237	0,97169	0,97099	76
14	0,97029	0,96959	0,96887	0,96815	0,96742	0,96667	**75**
15	0,96593	0,96517	0,96440	0,96363	0,96285	0,96206	74
16	0,96126	0,96046	0,95964	0,95882	0,95799	0,95715	73
17	0,95630	0,95545	0,95459	0,95372	0,95284	0,95195	72
18	0,95106	0,95015	0,94921	0,94832	0,94739	0,94646	71
19	0,94552	0,94457	0,94361	0,94264	0,94167	0,94068	**70**
20	0,93969	0,93869	0,93769	0,93667	0,93565	0,93462	69
21	0,93358	0,93253	0,93148	0,93042	0,92935	0,92827	68
22	0,92718	0,92609	0,92499	0,92388	0,92276	0,92164	67
23	0,92050	0,91936	0,91822	0,91706	0,91589	0,91472	66
24	0,91355	0,91236	0,91116	0,90996	0,90875	0,90753	**65**
25	0,90631	0,90507	0,90383	0,90259	0,90133	0,90007	64
26	0,89879	0,89752	0,89623	0,89493	0,89363	0,89232	63
27	0,89101	0,88968	0,88835	0,88701	0,88566	0,88431	62
28	0,88295	0,88158	0,88020	0,87882	0,87743	0,87603	61
29	0,87462	0,87321	0,87178	0,87036	0,86892	0,86748	**60**
30	0,86603	0,86457	0,86310	0,86163	0,86015	0,85866	59
31	0,85717	0,85567	0,85416	0,85264	0,85112	0,84959	58
32	0,84805	0,84650	0,84495	0,84339	0,84182	0,84025	57
33	0,83867	0,83708	0,83549	0,83389	0,83228	0,83066	56
34	0,82904	0,82741	0,82577	0,82413	0,82248	0,82082	**55**
35	0,81915	0,81748	0,81580	0,81412	0,81242	0,81072	54
36	0,80902	0,80730	0,80558	0,80386	0,80212	0,80038	53
37	0,79864	0,79688	0,79512	0,79335	0,79158	0,78979	52
38	0,78801	0,78622	0,78442	0,78261	0,78079	0,77897	51
39	0,77715	0,77531	0,77347	0,77162	0,76977	0,76791	**50**
40	0,76604	0,76417	0,76229	0,76041	0,75851	0,75661	49
41	0,75471	0,75279	0,75088	0,74896	0,74703	0,74509	48
42	0,74314	0,74119	0,73924	0,73728	0,73531	0,73333	47
43	0,73135	0,72937	0,72737	0,72537	0,72337	0,72136	46
44	0,71934	0,71732	0,71529	0,71325	0,71121	0,70916	**45**
45	0,70711						44
	60′	50′	40′	30′	20′	10′	Grados
	SENOS						

CAPITULO VI

MODIFICACIONES EN LOS MOTORES TRIFASICOS

1. Introducción

En los talleres de reparación de máquinas eléctricas, se presenta frecuentemente el caso de tener que modificar algunas de las características de un motor (o generador) porque interese utilizar dicha máquina bajo una tensión o a una velocidad para las que no ha sido construida.

Como la parte mecánica de la máquina no puede ser modificada (al menos desde el punto de vista económico), para acomodarse a las nuevas exigencias sólo cabe introducir modificaciones en los arrollamientos.

Aunque sin tener un buen conocimiento del cálculo de máquinas eléctricas, acompañado de larga experiencia práctica, resulta arriesgado tomar iniciativas en la variación o cambio de un arrollamiento (debido a los diversos factores que entran en juego), se pueden, sin embargo, dar algunas reglas que, aplicadas con criterio, resuelven cada problema.

Lo que sigue puede ser aplicado, en general, a todos los arrollamientos de corriente alterna, tanto de máquinas sincrónicas como asincrónicas y, en estas últimas, tanto a las de rotor bobinado como a las de jaula de ardilla.

2. Cambio de la tensión en bornes permaneciendo constantes el número de polos y la frecuencia

Este es el caso que con mayor frecuencia se presenta en la práctica: Una máquina calculada originalmente para una tensión V_o y una velocidad n_o, con un número $2p_o$ de polos y una frecuencia $f_o = p_o \cdot n_o/60$, se desea utilizar a una tensión V_n, sin cambiar ni el número de polos ni la frecuencia.

Ocurre, por ejemplo, cuando un motor que trabaja en determinada red, se tiene que conectar a otra red de la misma frecuencia pero de distinta tensión.

En este caso, solamente es necesario modificar el número de espiras en serie del arrollamiento del estator, así como la sección de los conductores, pero sin cambio alguno del plan del arrollamiento original. Esto es, el nuevo arrollamiento tendrá el mismo número de grupos y bobinas que el original, y todas las bobinas se dispondrán exactamente en las mismas ranuras que en el arrollamiento original; pero el número y el diámetro de los conductores de las bobinas deberán ser diferentes.

La máquina se desmontará y se procederá a extraer el arrollamiento original del estator, de acuerdo con las indicaciones del capítulo II, tomando nota de:

— El plan del arrollamiento (con sus conexiones).
— Forma y dimensiones de las bobinas.
— Número ω_o de espiras en serie por fase.
— Abertura de las ranuras del estator.
— Diámetros (aislado y desnudo) del conductor (o conductores).
— Clase de los aislamientos empleados.

Siendo V_n la nueva tensión de utilización de la máquina, el número ω_n de espiras en serie por fase que deberá llevar el nuevo arrollamiento, es:

$$\omega_n = \omega_o \cdot V_n/V_o$$

espiras que se habrán de repartir entre un número conocido de bobinas (el mismo del arrollamiento original) de tal modo que en cada ranura entre un número entero de conductores.

La sección S_n que deberá tener el conductor del nuevo arrollamiento, es:

$$S_n = S_o \cdot V_o/V_n$$

Siendo S_o la sección total del conductor del arrollamiento original (suma de secciones si hay conductores en paralelo). Para el nuevo arrollamiento, se escogerá el diámetro del conductor comercial que dé una sección igual o muy próxima a la S_n calculada (naturalmente, se pueden disponer varios conductores en paralelo, en vez de uno único, siempre que su suma de secciones sea igual o muy próxima a la calculada).

Si tras la modificación la sección total activa del cobre es la misma, no habrán variado ni la potencia ni el calentamiento originales.

Normalmente, cuando en las ranuras deben entrar menos conductores que habían (o sea, en el caso en que la tensión exigida es menor que la original), suele poderse aprovechar mejor la sección de la ranura, de modo que la sección de los conductores puede ser algo mayor que la calculada S_c, resultando que puede obtenerse una potencia algo superior a la original.

Por el contrario, cuando la tensión exigida es mayor que la original, deberán entrar más conductores por ranura, de modo que se suele aprovechar peor la sección de las ranuras y, quizá, es necesario utilizar conductores de sección algo inferior a la S_c calculada, resultando que la nueva máquina tendrá una potencia ligeramente inferior a la original.

En términos generales, los aislamientos utilizados en la modificación deben ser de la misma clase que los originales, y los cajetines de ranuras y los aislantes de fases serán del mismo espesor que antes, mientras la nueva tensión no sea muy considerablemente superior a la original. Si el cambio es a alta tensión, el problema debe ser resuelto por un técnico superior.

Como se ha dicho antes, el factor de aprovechamiento de la ranura (capítulo III, § 7) varía según el número de los conductores que debe albergar.

Naturalmente, antes de devanar el nuevo arrollamiento, hay que cerciorarse de que los lados de las bobinas caben en las ranuras. Por otra parte, hay que tener en cuenta que, si los conductores han de introducirse por la abertura de las ranuras, el diámetro exterior de los mismos (aislados) debe poder pasar sin rozaduras por dicha abertura (por lo que deberán utilizarse conductores en paralelo, en el caso de que hayan dificultades en este sentido).

Ejemplo:

Un motor asincrónico trifásico de 220/380 V tiene por fase 3 grupos de 2 bobinas, llevando cada bobina 30 espiras de hilo esmaltado de cobre de 0,50 mm de diámetro desnudo (aislado 0,56 mm). La abertura de cada ranura es de 1,5 mm. Calcular los datos del nuevo arrollamiento necesario para que dicho motor pueda funcionar (en triángulo), al mismo número de r. p. m., en una red trifásica de 500 V y de la misma frecuencia que la de la placa de características del motor.

El número de espiras en serie por fase es: $w_s = 3 \cdot 2 \cdot 30 = 180$; por lo tanto, el nuevo número de espiras en serie por fase deberá ser:

$$w_s = w_s \cdot V_n/V_s = 180 \cdot 500/220 = 409{,}0$$

Así, cada bobina deberá tener $409/6 = 68{,}1$ espiras en serie (tomaremos 68).

Como la sección del conductor original de 0,50 mm de diámetro es $S_c = 0{,}1964$ mm² (ver tablas de secciones), la sección del conductor que deberemos emplear será:

$$S_c = S_c \cdot V_n/V_s = 0{,}1964 \cdot 220/500 = 0{,}0864 \text{ mm}^2$$

En las tablas de conductores comerciales encontramos que el conductor de 0,30 mm de diámetro tiene una sección de 0,0706 mm² (demasiado pequeña), mientras que el conductor comercial inmediatamente posterior, de 0,35 mm de diámetro, tiene una sección de 0,0962 mm² (demasiado grande). Así pues, decidimos adoptar dos conductores en paralelo, los de diámetros 0,23 y 0,24 mm, que arrojan una sección total $S = 0{,}0415 + 0{,}0452 = 0{,}0867$, muy próxima a la que necesitamos según los cálculos.

Como los conductores escogidos tienen menor diámetro que el original, no habrá problema alguno para introducirlos por la abertura de las ranuras. Lo único que habrá que comprobar, antes de devanar el nuevo arrollamiento, es si los 136 conductores que han de entrar en cada ranura (68 de 0,23 mm de diámetro junto con otros 68 de 0,24 mm de diámetro), caben sin dificultad.

La clase del aislamiento deberá ser la misma que la original, pero el espesor (en ranuras, entre fases, y el de los conductores) deberá ser el adecuado a la nueva tensión superior de 500 V. Por ello, puede suceder que si el espesor de los cajetines de aislamiento de las ranuras hubiera de ser mayor que el original, seguramente será necesario tomar conductores de menor sección que la calculada (porque, de lo contrario, tal vez no quepan en las ranuras) de modo que, entonces, la potencia de la máquina transformada sería menor que la que originalmente desarrollaba.

En nuestro ejemplo, si se toman los diámetros 0,23 y 0,24 mm, la máquina transformada desarrollará, aproximadamente, la misma potencia que el motor original, sufriendo el mismo calentamiento.

El nuevo motor podrá ser conectado en triángulo a una red de 500 V y, también, cambiando su conexión a estrella, se podrá utilizar a una tensión de $500 \cdot 1{,}73 = 865$ V, siempre que el aislamiento sea suficiente para esta tensión.

La placa de características del motor deberá ser sustituida por otra donde aparezcan los nuevos valores de tensión y corriente.

El rotor del motor, tanto si es bobinado como si es en jaula de ardilla, no necesita modificación alguna.

Ejemplo:

El arrollamiento del estator de un motor asincrónico trifásico está calculado para 500 V (en estrella), y lleva 34 hilos por ranura, estando cada dos hilos devanados en paralelo. El diámetro del hilo desnudo es de 2 mm (diámetro del conductor aislado: 2,3 mm); la abertura de la ranura es de 3,5 mm.

Se desean conocer las modificaciones a efectuar en dicho estator para poder utilizar el motor (conectado en estrella) en una red de 380 V, permaneciendo constantes las demás características del motor.

El número de conductores en serie que deberá albergar cada ranura, es:

$$w_s = w_s \cdot V_n/V_s = (34/2) \cdot 380/500 = 12{,}92$$

Tomaremos, pues, 13 hilos en serie por ranura.

La sección del conductor original es (ver tablas) 3,142 mm². Como cada dos hilos se han devanado en paralelo, la sección total es $S_c = 2 \cdot 3{,}142 = 6{,}284$ mm². Por lo tanto, la sección S_c necesaria es:

$$S_c = S_c \cdot V_c/V_c = 6{,}284 \cdot 500/380 = 8{,}268 \text{ mm}^2$$

Si no utilizáramos conductores en paralelo, habría que tomar un hilo de 3,25 mm de diámetro desnudo, que es el que aproximadamente corresponde a la sección calculada. Sin embargo, dicho diámetro (incluso sin considerar el aislamiento) es excesivo para los 3,5 mm que tiene la abertura de la ranura.

Por ello, tomaremos el hilo comercial de diámetro 2,3 mm, cuya sección es de 4,155 mm², devanando dos hilos en paralelo, con lo que la sección total activa será de $2 \cdot 4{,}155 = 8{,}310$ mm², muy próxima a la calculada.

Antes de devanar el nuevo arrollamiento, habrá que comprobar si no hay dificultad de albergar en una ranura los 26 hilos de 2,3 mm de diámetro desnudo (aislado: 2,48 mm de diámetro).

La potencia de la máquina transformada, utilizando los conductores calculados, será aproximadamente la misma que la que desarrollaba el motor original, sufriendo el mismo calentamiento.

El nuevo motor podrá ser conectado en estrella a una red trifásica de 380 V y, también, cambiando su conexión a triángulo, se podrá utilizar a una tensión de $380/1{,}73 = 220$ V. La placa de características del motor deberá ser sustituida por otra donde aparezcan los nuevos valores de tensión y corriente.

El rotor del motor, tanto si es bobinado como si es en jaula de ardilla, no requiere modificación alguna.

3. Casos particulares del epígrafe anterior

Si la nueva tensión a la que deberá funcionar la máquina es precisamente igual a la mitad del valor de la tensión original (por ejemplo: de 110 V, en vez de 220 V), en muchos casos será posible variar las conexiones del arrollamiento original, subdividiéndolo en dos ramas en paralelo.

La posibilidad de efectuar esta operación se deduce inmediatamente a la vista del plan de arrollamiento original. Si hay tal posibilidad, no será necesaria otra operación, de modo que el arrollamiento original permanecerá en la máquina, modificando solamente las conexiones interiores del mismo.

Por el contrario, aumentar la tensión al doble de su valor original (independientemente de que el aislamiento debe ser suficiente) solamente será posible, sin cambiar el arrollamiento, en el caso de que éste contenga ya un número entero de ramas en paralelo. No basta, por ejemplo, que cada bobina esté compuesta de hilos en paralelo, ya que la conexión en serie de hilos devanados en paralelo puede poner en peligro el aislamiento de los conductores.

Si la tensión deseada tiene la relación $V_c = V_c/1{,}73$ respecto a la tensión original, podría ser la solución conectar el arrollamiento en triángulo, siempre que antes estuviera conectado en estrella.

Asimismo, cabe pasar de triángulo a estrella (si ello es posible) cuando se desea que $V_c = V_c \cdot 1{,}73$, pero en este caso hay que comprobar que el aislamiento original es suficiente para la nueva tensión.

Insistimos de nuevo en que cuando el estator se modifica únicamente para otra tensión, siempre permanece invariable el rotor.

4. Cambio de la frecuencia permaneciendo constante el número de polos

El problema se presenta cuando una determinada máquina, calculada para cierta frecuencia original f_c, se desea que funcione conectada a una red de frecuencia f_c, sin que varíe el número de polos. Ello sucede, por ejemplo, con los motores norteamericanos importados, que están calculados para una frecuencia de 60 Hz, y se desea que funcionen a la frecuencia de las redes eléctricas europeas, o sea, a 50 Hz.

Si el número de polos permanece invariable, es claro que la velocidad del motor variará en la misma relación de la variación de la frecuencia.

Si la tensión aplicada en bornes del motor se modifica en la misma relación de la variación de la frecuencia, no será necesario cambiar el arrollamiento. Por ejemplo: Un motor trifásico de 4 polos, 6 kW, 220 V y 50 Hz (1.500 r. p. m.), puede ser utilizado sin modificación en una red de 110 V y 25 Hz. En este caso, la potencia que desarrollará el motor en las nuevas condiciones será de unos 3 kW, y su velocidad sincrónica de 750 r. p. m.

Desde luego, hay que tener presente que la disminución de velocidad limita la ventilación del motor, de modo que la potencia de la máquina conectada a la red de 25 Hz será algo menor que la mitad de la potencia que rinde originalmente a 50 Hz de frecuencia.

Cuando la frecuencia crece, crecen también las pérdidas en el hierro, por

lo que hay que contar con un mayor calentamiento de la máquina; por otra parte, se mejora la ventilación debido a que la velocidad crece con la frecuencia.

Todos los factores expuestos deben ser tenidos en cuenta cuando se modifica la frecuencia de la tensión de alimentación de un motor.

Si solamente debe variar la frecuencia aplicada, pero no hay posibilidad de modificar la tensión en bornes al valor proporcional adecuado, resulta entonces necesario cambiar el arrollamiento del estator, ya que es imprescindible modificar el número y diámetro de los conductores en serie, aunque se conservará el plan de arrollamiento original.

En este caso, la máquina se desmontará y se procederá a extraer el arrollamiento del estator, y a tomar nota del mismo, tal como se ha hecho en el § 2. Mientras no se modifique el número de polos de la máquina, no hay que cambiar el rotor de la misma, sea éste bobinado o en jaula de ardilla.

Con la notación empleada (subíndice *o* para el arrollamiento original, subíndice *u* para el nuevo arrollamiento), el número N de conductores en serie por ranura deberá ser:

$$N_u = N_o \cdot f_o/f_u$$

Mientras que la sección que deberán tener los conductores, es:

$$S_u = S_o \cdot f_u/f_o$$

La velocidad de la máquina (motor), manteniendo constante el número de polos, será:

$$n_u = n_o \cdot f_u/f_o$$

Mientras que la potencia (prescindiendo de la influencia que puedan originar las variaciones en la ventilación y en el calentamiento, por la modificación de la velocidad y de las pérdidas en el hierro, respectivamente), será:

$$P_u = P_o \cdot f_u/f_o$$

Ejemplo:

Se tiene un motor trifásico calculado para una tensión en bornes de 220 V a una frecuencia de 60 Hz. Se desea conectar este motor, sin modificación alguna del mismo, a una red de 30 Hz. Calcular la tensión en bornes que deberá ser aplicada.

Para poder conectar el motor, sin modificarlo, a una frecuencia de valor mitad de la frecuencia para la que está calculado, hay que aplicarle en bornes una tensión también igual a la mitad de la tensión original. Así, pues, habrá que aplicarle en bornes 110 V.

Ejemplo:

Se tiene un motor trifásico calculado para una tensión de 110 V y 60 Hz. Se desea conectar este motor, sin modificarlo, a una red de 50 Hz. Calcular la tensión en bornes que deberá serle aplicada.

Según lo expresado anteriormente, la tensión que deberá serle aplicada en bornes, es:

$$V_u = V_o \cdot f_u/f_o = 110 \cdot 50/60 = 92 \text{ V}$$

Ejemplo:

En el banco de pruebas de un taller se quiere ensayar un motor trifásico calculado para una tensión de 110 V y una frecuencia de 16,6 Hz. La frecuencia de la red trifásica disponible es de 50 Hz. En el supuesto de que no hay que modificar el motor, calcular la tensión que es necesario aplicarle en bornes para el ensayo.
Se tendrá:

$$V_u = V_o \cdot f_u/f_o = 110 \cdot 50/16,6 = 330 \text{ V}$$

Naturalmente, antes de aplicar dicha tensión, hay que asegurarse de que el aislamiento del motor original es suficiente para soportarla, de lo contrario no se debe efectuar el ensayo.

Ejemplo:

Un motor asincrónico trifásico de 10 CV a 1.800 r.p.m., tiene un arrollamiento (estator) previsto para funcionar a 60 Hz. Dicho arrollamiento consta de 100 conductores por ranura, de diámetro desnudo igual a 0,10 mm, estando cada dos hilos devanados en paralelo.

Calcular los datos de la máquina si debe funcionar a una frecuencia de 50 Hz sin modificar la tensión original en bornes.

Prescindiendo de las modificaciones de refrigeración y pérdidas en el hierro, la potencia que desarrollará el motor en las nuevas condiciones será:

$$P_u = P_o \cdot f_u/f_o = 10 \cdot 50/60 = 8,3 \text{ CV}$$

La velocidad de funcionamiento será:

$$n_u = n_o \cdot f_u/f_o = 1.800 \cdot 50/60 = 1.500 \text{ r.p.m.}$$

El número de conductores en serie, por ranura, deberá ser:

$$N_u = N_o \cdot f_u/f_o = (100/2) \cdot 60/50 = 60$$

La sección del conductor original (ver tablas) es de 0,00785 mm², y como hay dos conductores en paralelo, la sección activa total es $2 \cdot 0,00785 = 0,0157$ mm². Por tanto, la sección activa de los conductores del nuevo arrollamiento, deberá ser:

$$S_u = S_o \cdot f_u/f_o = 0,0157 \cdot 50/60 = 0,01308 \text{ mm}^2$$

De modo que se puede tomar el hilo comercial de 0,13 mm de diámetro desnudo, cuya sección es 0,01327 mm², muy próxima a la calculada. Naturalmente, cabe la posibilidad de utilizar varios conductores en paralelo.

Puesto que la tensión del nuevo motor es la misma que la tensión original, tomaremos el mismo espesor (y clase) para el aislamiento de la máquina transformada. La placa de características del motor deberá indicar los nuevos valores de la potencia, corriente, tensión y velocidad. El rotor del motor no sufrirá modificación alguna.

5. Variación del número de polos permaneciendo constantes la tensión y la frecuencia

Esta modificación solamente tiene lugar en las máquinas asincrónicas. Trae consigo una variación del número de circuitos magnéticos, así como una variación del valor del flujo magnético por polo.

Es el problema que mayores dificultades presenta, de modo que para abordarlo con éxito es necesario poseer buenos conocimientos de cálculo y larga experiencia.

Una disminución del número de polos exige un aumento del ancho de la corona del estator. En general, pues, no resulta posible disminuir el número de polos, a menos que la máquina estuviera prevista para tal contingencia (algunos constructores dan el mismo ancho a las coronas del estator de 4 y de 6 polos).

Así, pues, en el caso de que hubiera que disminuir el número de polos, la primera cuestión es determinar si el ancho de la culata del estator permite tal variación; si no es así, no se puede transformar la máquina.

Solamente por cálculo es posible decidir si el ancho de la corona de un estator es suficiente para determinado número de polos.

En el caso de que el número de polos deba ser mayor, no hay dificultades. Será necesario cambiar el arrollamiento del estator, y también el del rotor, si es que éste está bobinado.

Al tener que utilizar otro arrollamiento, con un nuevo plan, o sea, con una distribución diferente de un cierto número de bobinas y grupos (también distintos del original), ocurre a menudo que, como el número de ranuras viene obligado, no es posible devanar un arrollamiento entero, sino que el arrollamiento tiene que ser forzosamente fraccionario.

Un factor que hay que tener en cuenta, y que dificulta el cálculo de la transformación a efectuar, es el factor de bobinado (cap. V). Al modificar el plan del arrollamiento, varía el factor de bobinado. Por lo tanto, para una transformación correcta, es necesario conocer el factor de bobinado del arrollamiento primitivo y calcular el factor de bobinado del nuevo arrollamiento, haciendo intervenir estos valores en los cálculos del número de espiras del arrollamiento de la máquina transformada.

No solamente hay que tener en cuenta el factor de bobinado correspondiente al paso del devanado, lo que sería relativamente sencillo de calcular (cap. V), sino el factor de bobinado correspondiente a todo el arrollamiento, cuestión complicada, sobre todo si se trata de arrollamientos fraccionarios.

Ciertamente que, salvo casos especiales, teniendo en cuenta el factor de bobinado correspondiente al paso del devanado, la transformación podrá llevarse a cabo, con incorrección, pero sin que quepa esperar un desastre. Con la notación hasta ahora empleada, el número de espiras por ranura en la máquina transformada, deberá ser:

$$N_n = N_a \cdot p_a \cdot \xi_a / p_n \cdot \xi_n$$

Donde p representa el número de pares de polos y ξ el factor de bobinado total (que, aproximadamente, se puede hacer intervenir considerando solamente el paso del devanado).

En cuanto a la sección activa de los conductores, deberá ser:

$$S_n = S_a \cdot p_a / p_n$$

La potencia que desarrollará la máquina en las nuevas condiciones, prescindiendo de la influencia que la variación de velocidad tenga sobre la refrigeración, será:

$$P_n = P_a \cdot p_n / p_a$$

Y la nueva velocidad del motor, será:

$$n_n = n_a \cdot p_a / p_n$$

Las fórmulas anteriores son válidas tanto para el arrollamiento del estator como para el del rotor, que habrá de ser, también, modificado siempre que esté bobinado.

Ejemplo:

Un motor asincrónico tetrapolar de 8 CV a 1.500 r. p. m. tiene 30 espiras por bobina y está devanado a una capa con paso diametral; el diámetro del conductor desnudo es de 1,5 mm. Se desea transformar este motor en uno exapolar, sin modificación de la tensión en bornes ni de la frecuencia. Sabiendo que el nuevo factor de bobinado es $\xi_n = 0{,}905$, calcular el nuevo arrollamiento a disponer.

Con los datos del enunciado solamente cabe calcular los datos numéricos de los conductores del arrollamiento. Para resolver el problema totalmente habría, sin embargo, que determinar el nuevo plan de arrollamiento.

La potencia que desarrollará el motor transformado será, prescindiendo de la influencia del cambio de velocidad en la refrigeración:

$$P_n = P_n \cdot p_n/p_n = 8 \cdot 2/3 = 5{,}3 \text{ CV}$$

En realidad, se obtendrá una potencia algo menor, debido a la menor refrigeración que se obtiene a velocidad más lenta.

La nueva velocidad de giro del motor, será:

$$n_n = n_n \cdot p_n/p_n = 1.500 \cdot 2/3 = 1.000 \text{ r. p. m.}$$

Como el arrollamiento es a una capa, hay un solo lado de bobina en cada ranura, de modo que el número de conductores en serie por ranura es 30. El paso diametral (considerando solamente el factor de paso del devanado) supone que el factor de bobinado es $\xi_n = 1$. Por lo tanto, el número de conductores en serie, por ranura, en el nuevo arrollamiento, deberá ser:

$$N_n = N_n \cdot p_n \cdot \xi_n/p_n \cdot \xi_n = 30 \cdot 3 \cdot 1/2 \cdot 0{,}905 = 90/1{,}81 = 50$$

El conductor utilizado deberá tener una sección:

$$S_n = S_n \cdot p_n/p_n = 1{,}7671 \cdot 2/3 = 1{,}178 \text{ mm}^2$$

Se podrá tomar el hilo comercial de 1,2 mm de diámetro desnudo, cuya sección es 1,131, bastante próxima a la calculada. Evidentemente, se podrán disponer, en vez del hilo escogido, varios conductores en paralelo.

Si el motor tiene el rotor bobinado, será preciso, también, modificar dicho arrollamiento. La placa de características del motor deberá ser sustituida por otra donde consten los nuevos valores de la potencia, intensidad de corriente, velocidad y número de polos.

6. Resumen de algunas consideraciones importantes

El rotor deberá solamente ser cambiado cuando varíe el número de polos, siempre que dicho rotor esté bobinado. Si el rotor es en jaula de ardilla, o no hay modificación del número de polos, se utilizará el mismo rotor, sin variación alguna.

Siempre que la máquina deba trabajar bajo una tensión superior a la original, no hay que olvidar que el aislamiento debe ser el adecuado a dicha tensión superior.

Si, al tener que cambiar el arrollamiento (del rotor o estator), se modifica el factor de bobinado (lo que sucede, por ejemplo, cuando hay una variación del paso del bobinado), no solamente hay que considerar el número de conductores en serie, sino el producto de éstos por el correspondiente factor de bobinado (total).